



Universidad
Carlos III de Madrid

Departamento de Ingeniería Mecánica

PROYECTO FIN DE CARRERA

TÍTULO: ESTUDIO DEL USO DE IMANES PERMANENTES COMO RESORTE MECÁNICO DE RIGIDEZ VARIABLE

Autor: Roberto García Pérez

Tutor: Efrén Díez Jiménez

Director: José Luis Pérez Díaz

Leganés, Septiembre 2011

Título: Muelle Magnético
Autor: Roberto García Pérez
Director: José Luis Pérez Díaz

EL TRIBUNAL

Presidente: _____

Vocal: _____

Secretario: _____

Realizado el acto de defensa y lectura del Proyecto Fin de Carrera el día ____ de _____
de 20__ en Leganés, en la Escuela Politécnica Superior de la Universidad Carlos III de
Madrid, acuerda otorgarle la CALIFICACIÓN de

VOCAL

SECRETARIO

PRESIDENTE

Resumen

El presente proyecto pretende estudiar el uso de imanes permanentes como resorte mecánico.

Se ha realizado el diseño de dos modelos diferentes, en función del estudio a realizar.

En el primer caso, se ha llevado a cabo un estudio experimental para el cual se ha creado un sistema que permite obtener la rigidez del resorte magnético compuesto por diferentes combinaciones de imanes.

Para el segundo caso, se ha llevado a cabo un estudio teórico con las diferentes combinaciones medidas.

De la misma manera que para el primer estudio realizado, se ha obtenido una serie de rigideces.

Una vez realizados los estudios experimental y teórico, se han comparado para evaluar la fiabilidad del método de elementos finitos.

Una vez realizado el estudio experimental general de los sistemas de imanes, se le ha buscado una posible aplicación. Para ello se ha realizado el estudio sobre la aplicación de un tipo de resorte magnético como sustitutivo del muelle tradicional en una motocicleta.

Palabras clave: Resorte, imán, fuerza.

Abstract

The aim of this project is to analyze the use of permanent magnets as mechanical springs.

We have done both an experimental and theoretical approach of the use of permanent magnets as a mechanical spring.

In the first case, an experimental study permits to obtain the magnetic spring stiffness with different magnets combinations.

In the second case, the theoretical study permits to obtain a comparison between calculated combinations and those measured.

Finally, we have tried to apply a permanent magnet based spring system in order to replace the typical mechanical spring used in the suspension of a motorbike.

Key words: variable springs, magnetic force, magnetomechanical behavior.

Índice general

Capítulo 1: Introducción y objetivos	1
1.1. Introducción	1
1.2. Objetivos	2
1.3. Fases del desarrollo	3
1.4. Medios empleados	3
1.5. Estructura de la memoria	3
Capítulo 2: Introducción al magnetismo y materiales magnéticos	5
2.1. Magnetismo y materiales magnéticos	5
2.2. Comportamiento magnético de los materiales	7
2.2.1. Diamagnetismo	7
2.2.2. Paramagnetismo	8
2.2.3. Ferromagnetismo	8
2.2.4. Antiferromagnetismo	9
Capítulo 3: Estudio experimental	10
3.1. Descripción del experimento	10
3.2. Sistema experimental	11

3.3. Datos del sistema de medición	14
3.3.1. Medición para imanes anulares	14
3.3.1.1. Medición para 2 imanes anulares	15
3.3.1.2. Medición para 3 imanes anulares	16
3.3.1.3. Medición para 4 imanes anulares	16
3.3.2. Medición para imanes cilíndricos	17
3.3.2.1 Medición para 2 imanes cilíndricos	18
3.3.2.2. Mediciones para 3 imanes cilíndricos	18
3.4. Conclusiones del experimento	19
Capítulo 4: Estudio teórico	20
4.1. Descripción del modelo	20
4.2. Datos del estudio teórico	23
4.2.1. Datos para los imanes anulares	23
4.2.1.1. Datos para 2 imanes anulares	23
4.2.1.2. Datos para 3 imanes anulares	24
4.2.1.3. Datos para 4 imanes anulares	24
4.2.2. Datos para los imanes cilíndricos	25
4.2.2.1. Daos para 2 imanes cilíndricos	26
4.2.2.2. Datos para 3 imanes cilíndricos	27
4.3. Conclusiones del cálculo teórico	28
Capítulo 5: Comparativa de estudios	29
5.1. Comparativa imanes anulares	29
5.2. Comparativa imanes cilíndricos	30
Capítulo 6: Presupuesto	31
Capítulo 7: Aplicación del sistema de imanes a una moto	33
7.1. Introducción	33
7.2. Estado del arte	33
7.3. Estudio realizado	35
7.4 Proceso de diseño	37

7.5. Datos obtenidos	38
7.5.1. Resultados para los imanes	39
7.5.1.1. Altura de 5 mm, Rext de 35 mm y Rint de 25 mm	39
7.5.1.2. Altura de 10 mm, Rext de 35 mm y Rint de 25 mm	41
7.5.1.3. Altura de 25 mm, Rext de 35 mm y Rint de 25 mm	43
7.6. Modificación del muelle magnético	44
7.7. Conclusiones del modelado de un muelle magnético para una moto	46
Capítulo 8: Conclusiones generales del estudio	47
8.1. Ventajas	47
8.2. Inconvenientes	48

Índice de figuras

Figura 1: Esquema del sistema imanes.	2
Figura 2: Dipolo magnético.	6
Figura 3: Mecanismo de generación de un momento magnético.	7
Figura 4: Orientación de los dipolos en un material diamagnético.	7
Figura 5: Dipolos magnéticos en un material paramagnético.	8
Figura 6: Dominios magnéticos en un material ferromagnético.	8
Figura 7: Orientación de los dominios magnéticos en un material antiferromagnético.	9
Figura 8: Esquema del experimento realizado.	10
Figura 9: Sistema sustentador y guía de los imanes	11
Figura 10: Sistema empujador.	12
Figura 11: Imanes.	12
Figura 12: Pesos.	12
Figura 13: Sistema experimental.	13
Figura 14: Sistema experimental con imanes anulares.	14
Figura 15: Gráfica Fuerza-Altura para los imanes anulares.	17
Figura 16: Gráfica Fuerza – Altura para los imanes cilíndricos.	19
Figura 17: Croquis estudio teórico.	20
Figura 18: Configuración 1 de imanes en el programa Maxwell.	21
Figura 19: Configuración 2 e imanes en el programa Maxwell.	22
Figura 20: Gráfica Fuerza – Altura para los imanes anulares.	25

Figura 21: Gráfica Fuerza – Altura para los imanes cilíndricos.	27
Figura 22: Gráfica Fuerza – Altura para los imanes anulares (Experimental y teórico).	29
Figura 23: Gráfica Fuerza-Altura para los imanes cilíndricos (Experimental y teórico).	30
Figura 24: Dispositivo formado por una suspensión magnética de precisión.	35
Figura 25: Amortiguación de la moto objeto de estudio.	36
Figura 26: Gráfica Fuerza – Compresión para el muelle de la moto.	37
Figura 27: Imagen de 2 imanes para la suspensión de motocicleta.	38
Figura 28: Croquis del resorte magnético de la suspensión de motocicleta.	39
Figura 29: Gráfica Fuerza – Altura con un imán de 5mm de altura.	40
Figura 30: Gráfica Fuerza – Altura con un imán de 5mm de altura modificado.	41
Figura 31: Gráfica Fuerza – Altura con un imán de 10mm de altura.	42
Figura 32: Gráfica Fuerza – Altura con un imán de 10mm de altura modificado.	43
Figura 33: Gráfica Fuerza – Altura con un imán de 25mm de altura.	44
Figura 34: Gráfica Fuerza – Altura con un imán de 25mm de altura modificado.	45

Índice de tablas

Tabla 1: Mediciones experimentales para 2 imanes anulares.	15
Tabla 2: Mediciones experimentales para 3 imanes anulares.	16
Tabla 3: Mediciones experimentales para 4 imanes anulares.	16
Tabla 4: Mediciones experimentales para 2 imanes cilíndricos.	18
Tabla 5: Mediciones experimentales para 3 imanes cilíndricos.	18
Tabla 6: Datos teóricos para 2 imanes anulares.	23
Tabla 7: Datos teóricos para 3 imanes anulares.	24
Tabla 8: Datos teóricos para 4 imanes anulares.	24
Tabla 9: Datos teóricos para 2 imanes cilíndricos.	26
Tabla 10: Datos teóricos para 3 imanes cilíndricos.	27
Tabla 11: Patente de un sistema de repulsión magnético.	34
Tabla 12: Características del muelle.	36
Tabla 13: Precarga y fuerza máxima del muelle.	36
Tabla 14: Datos para 2 imanes y altura 5 mm.	40
Tabla 15: Datos para 2 imanes y altura 10 mm.	42
Tabla 16: Datos para 2 imanes y altura 25 mm.	43
Tabla 17: Datos para 2 imanes y altura 25 mm (modificado).	45

Capítulo 1

Introducción y objetivos

1.1 Introducción

Desde la aparición de los primeros imanes permanentes de alta magnetización basados en tierras raras se ha incrementado notablemente el uso de éstos para aplicaciones mecánicas tales como relés, rodamientos, interruptores.

El objeto de estudio es la aplicación de imanes permanentes como resortes mecánicos de rigidez variable.

Para ello se ha llevado a cabo un estudio de comportamiento tanto teórico como experimental de los imanes. De esta manera se puede ver el comportamiento que tienen los imanes y las fuerzas que desarrollan.

El desarrollo del trabajo de los imanes permanentes se basa en el comportamiento que tienen los muelles progresivos, los cuales varían su dureza en función de la compresión que tienen.

La figura 1 ilustra de forma esquemática unos de los sistemas de muelles que se van a experimentar.

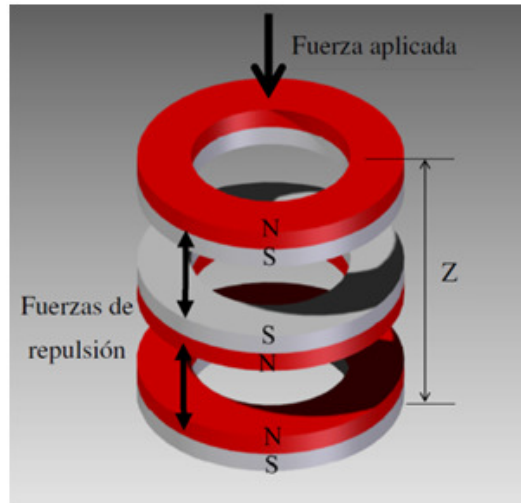


Figura 1: Esquema del sistema imanes.

El material de los imanes con los que se ha ensayado el experimento es el Neodimio-Hierro-Boro ($\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{b}$)

1.2 Objetivos

El principal objetivo es el estudio del comportamiento mecánico de los imanes a través de un estudio teórico y experimental, y ver cuál es su posible aplicación.

Una vez realizado el estudio de comportamiento de los imanes experimentalmente se procederá a la comparativa entre las fuerzas obtenidas de forma teórica y experimental.

Al realizar esta comparativa se podrá determinar si es viable la sustitución de resortes helicoidales por imanes permanentes, evaluando las ventajas y los inconvenientes de cada uno de ellos.

Una vez se haya visto la viabilidad del modelo se llevará a cabo el modelado de un muelle magnético para una suspensión de moto.

1.3 Fases del desarrollo

El desarrollo del proyecto se puede dividir en dos partes diferenciadas:

1. Estudio del comportamiento de los imanes: En este apartado se ha estudiado el comportamiento de los imanes tanto de forma teórica como experimental.
2. Aplicación del sistema de imanes a una moto como resorte mecánico de rigidez variable.

1.4 Medios empleados

Para el desarrollo del estudio de los imanes se han utilizado los siguientes medios:

1. Desarrollo del sistema experimental: Se ha requerido del uso de las herramientas apropiadas para su construcción.
 - a. Tablas de maderas de diferentes tamaños y grosores para construir el soporte base y el empujador.
 - b. Tubos de plástico de diferentes tamaños para construir la guía de los imanes.
 - c. Imanes anulares e imanes cilíndricos con los que experimentar.
 - d. Calibre para medir alturas.
 - e. Pesas de diferentes tamaños para aplicar las cargas de forma controlada.
2. Desarrollo del estudio teórico: Se ha requerido del programa Maxwell para ordenador. Se ha utilizado una versión de evaluación 2D.
3. Desarrollo de imanes permanentes sobre una moto: Se ha hecho uso del programa de elementos finitos Ansys versión académica.

1.5 Estructura de la memoria

La estructuración de la memoria viene definida de la siguiente manera:

Capítulo 1: Se describe el objetivo del estudio de los imanes permanentes, además de las necesidades para llevar a cabo el desarrollo del mismo.

Capítulo 2: Introducción al magnetismo y a los materiales magnéticos.

Capítulo 1: Introducción y objetivos

Capítulo 3: Se detalla el estudio experimental junto con los datos obtenidos en el mismo.

Capítulo 4: Se detalla el estudio teórico junto con los datos obtenidos en el mismo.

Capítulo 5: Se llevará a cabo la comparativa de los resultados de los estudios experimental y teórico.

Capítulo 6: Se detalla un presupuesto aproximado para el desarrollo total del experimento.

Capítulo 7: Se describe una posible aplicación del sistema de imanes a una suspensión de una motocicleta.

Capítulo 8: Conclusiones generales del estudio de imanes permanentes como resorte magnético.

Capítulo 2

Introducción al magnetismo y materiales magnéticos

2.1 Magnetismo y materiales magnéticos

Los imanes ejercen una gran cantidad de fuerza a una determinada distancia, lo que hace que su uso esté bastante extendido dentro de la ingeniería.

Una vez se conoce la fuerza que puede desarrollar un imán, se puede aplicar para un determinado diseño específico.

Para obtener dicha fuerza, existen diferentes procesos para conocer el momento magnético, que a su vez, a partir de una serie de ecuaciones, permite el cálculo de las fuerzas de atracción y repulsión entre imanes.

Una vez dicho esto, se puede definir el magnetismo como el fenómeno por el cual los materiales muestran una fuerza de atracción o de repulsión entre ellos, o sobre otros materiales.

Hay ciertos materiales que son conocidos por sus propiedades magnéticas (Hierro, aceros, etc) Sin embargo, todas las sustancias se ven influidas ante la presencia de un campo magnético.

Si se observa el magnetismo se puede ver que presenta una naturaleza dipolar, es decir, siempre existen dos polos magnéticos que se encuentran separados una distancia.

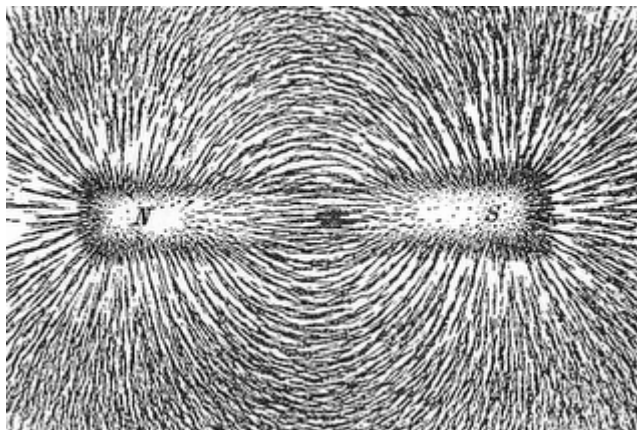


Figura 2: Dipolo magnético.

Los campos magnéticos pueden ser producidos por conductores de corriente, de manera que si se coloca una barra de hierro desimanada dentro de un solenoide por el que pasa una corriente eléctrica se obtiene que el campo magnético exterior al solenoide es mayor con la barra imanada dentro del mismo.

El aumento del campo magnético se debe a la suma de los campos generados por el solenoide y el campo magnético externo a la barra imanada. Este nuevo campo se denomina inducción magnética (B)

La inducción B es la suma del campo aplicado H y el campo externo causado por la imanación de la barra dentro del solenoide. El momento magnético inducido por unidad de volumen debido a la barra se denomina intensidad de imanación y se denomina por M .

De esta manera podemos expresar la inducción de la siguiente forma:

$$\vec{B} = \mu_o \vec{H} + \mu_o \vec{M} = \mu_o (\vec{H} + \vec{M})$$

donde μ_0 es la permeabilidad magnética del vacío.

Al colocar un material ferromagnético dentro de un campo magnético, aumenta la intensidad del campo magnético. Esto se mide mediante la permeabilidad magnética, definida como:

$$\mu = \frac{B}{H}$$

Si el campo magnético se aplicase en vacío, $\mu_0 = \frac{B}{H}$ donde $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ Tm / A}$

Debido a que la imanación de un material magnético es proporcional al campo aplicado, el factor de proporcionalidad llamado susceptibilidad magnética χ_m , se define como:

$$\chi_m = \frac{M}{H}$$

El magnetismo se origina por el movimiento de los electrones, por lo que el movimiento de los electrones dentro de un hilo conductor generará un campo magnético alrededor del mismo.

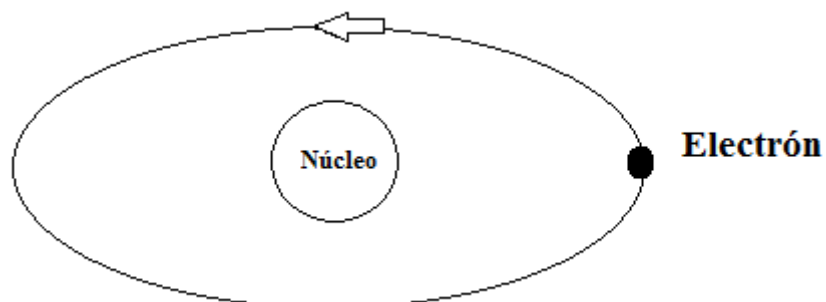


Figura 3: Mecanismo de generación de un momento magnético.

Todos los materiales exhiben algún tipo de comportamiento magnético, el cual depende de la respuesta del electrón y los dipolos magnéticos a la aplicación de un campo magnético aplicado externamente.

2.2 Comportamiento magnético de los materiales

2.2.1 Diamagnetismo

Se trata de una forma débil de magnetismo que no es permanente y que sólo persiste mientras hay aplicado un campo externo. De esta manera se genera un momento magnético muy pequeño que se opone al campo externo.

El campo externo produce un cambio en el movimiento orbital que describen los electrones.

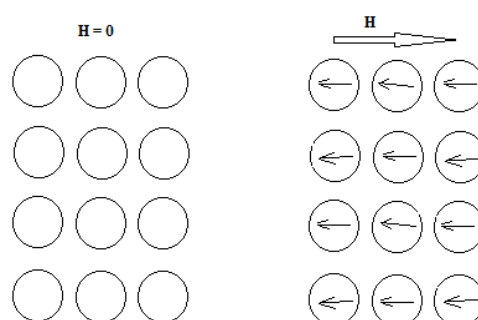


Figura 4: Orientación de los dipolos en un material diamagnético.

La figura 4 muestra las configuraciones del dipolo magnético de para un material diamagnético en presencia o no de un campo externo.

2.2.2 Paramagnetismo

En algunos materiales cada átomo posee un momento dipolar permanente que está orientado al azar. De esta manera, cuando se les aplica un campo externo, todos se alinean en la dirección del mismo.

Cada dipolo actúa individualmente, sin interactuar con los dipolos adyacentes, y una vez se deja de aplicar el campo, el efecto desaparece.

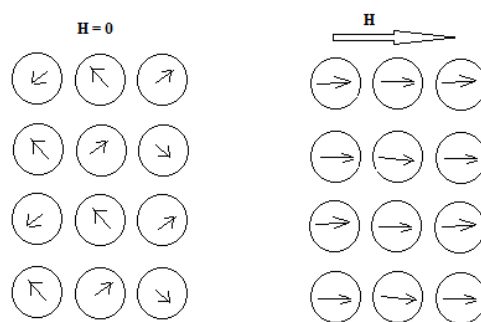


Figura 5: Dipolos magnéticos en un material paramagnético.

2.2.3 Ferromagnetismo

Ciertos materiales poseen un momento magnético permanente en ausencia de un campo externo y manifiestan magnetizaciones muy largas y permanentes (Tales como Hierro, Cobalto o Níquel)

En estos materiales, a temperatura ambiente, los espines de los electrones de las capas 3d de los átomos adyacentes, se alinean en una dirección paralela. Dicho fenómeno se conoce como imanación espontánea.

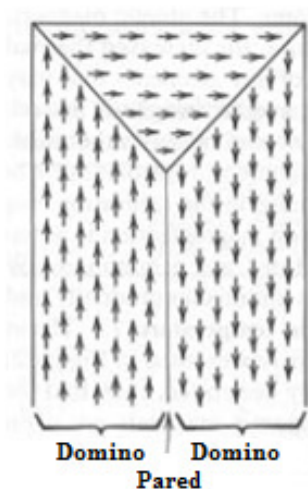


Figura 6: Dominios magnéticos en un material ferromagnético.

Si los dominios están aleatoriamente orientados entonces no se genera imanación neta en una muestra. En una muestra ferromagnética, los dominios adyacentes están separados por bordes de dominios ó paredes tal y como muestra la figura 6.

2.2.4 Antiferromagnetismo

En presencia de un campo magnético, los dipolos magnéticos de los átomos de los materiales antiferromagnéticos se alinean por sí mismo en direcciones opuestas.

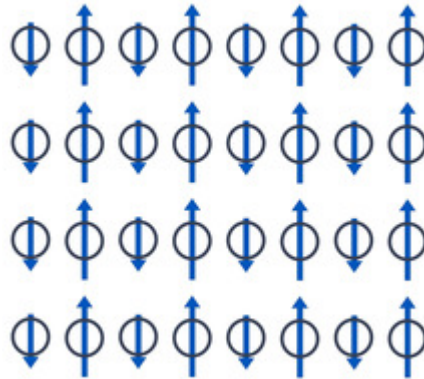


Figura 7: Orientación de los dominios magnéticos en un material antiferromagnético.

Capítulo 3

Estudio experimental

3.1 Descripción del experimento

En esta parte se va a llevar a cabo el estudio del comportamiento de diferentes configuraciones de imanes como si se tratase de un resorte mecánico.

Para ello se ha realizado la medición de las alturas correspondientes entre los imanes cuando se les aplica una fuerza externa que les obliga a aproximarse, es decir, su rigidez.

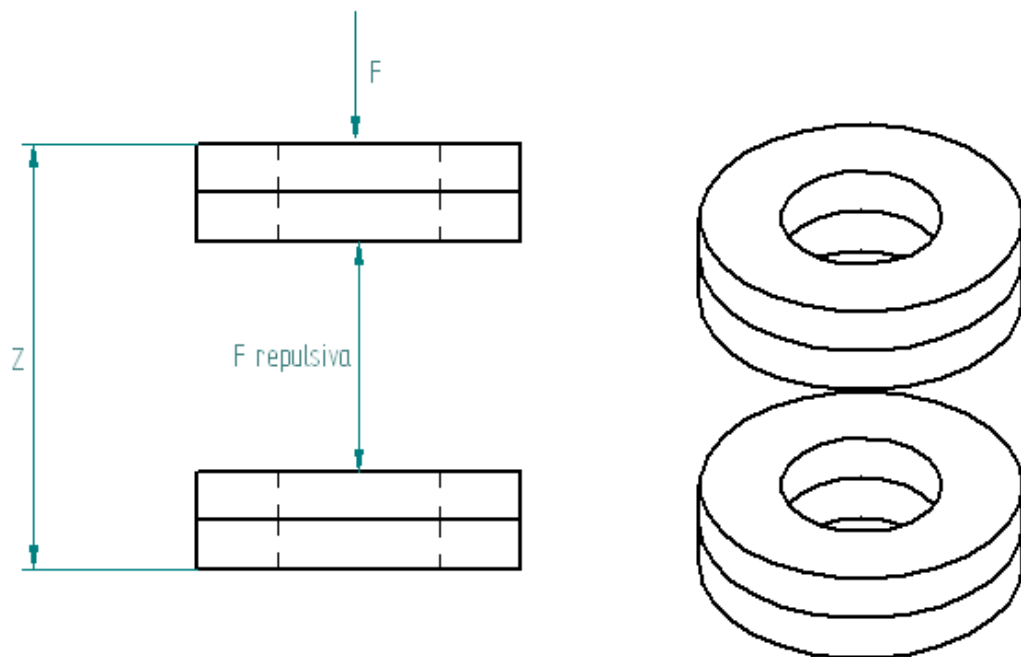


Figura 8: Esquema del experimento realizado.

La figura 4 muestra un esquema del experimento realizado.

El experimento se va a llevar a cabo con dos tipos de imanes diferentes. Los primeros son de forma anular, y los segundos, de forma cilíndrica.

Para cada uno de los imanes se procederá a realizar varias mediciones diferentes en función del número de imanes que se introduzcan en el sistema de medición.

De esta manera se verá cómo reacciona el sistema ante la presencia de más o menos imanes, viéndose si es más efectivo el uso de muchos imanes o de únicamente dos de ellos.

3.2 Sistema experimental

En el sistema de experimental se pueden diferenciar de forma clara cuatro partes diferentes:

1. El sistema sustentador y guía de los imanes (Figura 5)
2. El sistema empujador de los imanes (Figura 6)
3. Los imanes (Figura 7)
 - a. Imanes anulares ($z = 5\text{mm}$, $R_{\text{interno}} = 16\text{mm}$, $R_{\text{externo}} = 26\text{mm}$)
 - b. Imanes cilíndricos ($z = 25\text{mm}$, $R = 6\text{mm}$)
4. Los pesos para ejercer la fuerza sobre los empujadores (Figura 8)

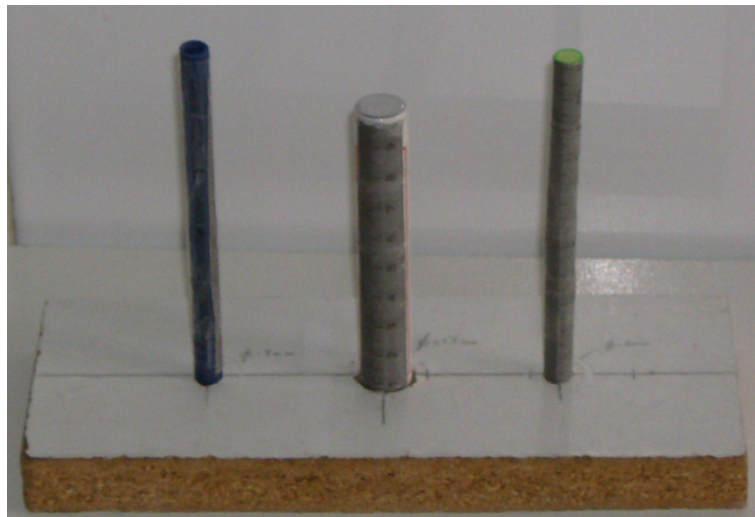


Figura 9: Sistema sustentador y guía de los imanes.

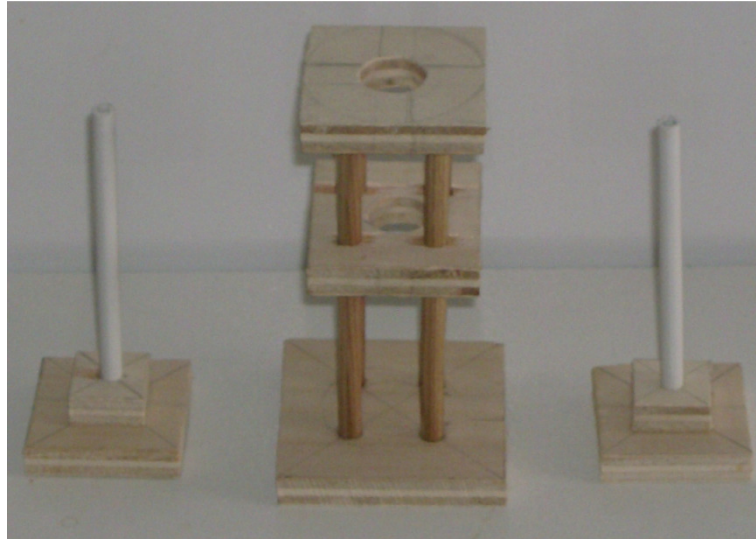


Figura 10: Sistema empujador.

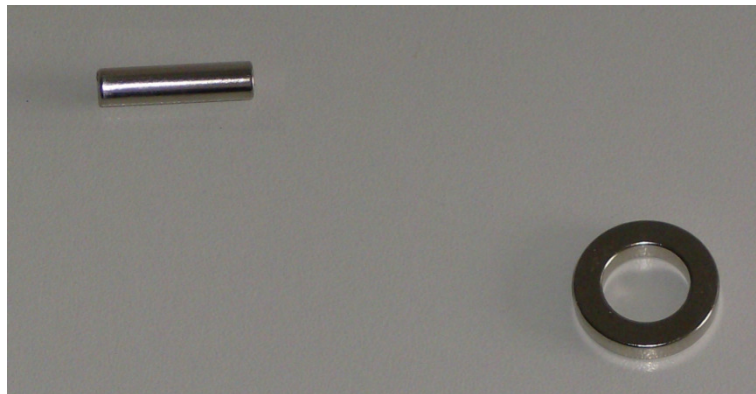


Figura 11: Imanes.



Figura 12: Pesos.

En la figura 9 se aprecia el sistema sustentador con tres guías diferentes, una para los anillos, y la otras dos para los imanes cilíndricos. Esto se debe a que para el experimento de los imanes cilíndricos se han construido dos zonas de experimentación iguales (A ambos lados) por la fragilidad del mismo.

Capítulo 3: Estudio experimental

Se ha construido de esta manera para que, en caso de ruptura de uno de ellos, poder continuar el experimento con el otro modelo.

Los tres modelos se han construido con materiales paramagnéticos para que no haya efectos del sistema sobre las medidas que se han tomado.

A cada uno de los modelos se le ha adherido una regla para llevar a cabo la medición de las alturas. Sin embargo, para poder ser más precisos se ha llevado a cabo la toma de las medidas mediante un calibre.

En la figura 10 se pueden apreciar los empujadores de los imanes, los cuales han sido contruidos en madera para evitar el campo magnético creado por los imanes.

Al igual que en caso de las guías, se han construido dos modelos de empujador, uno para los imanes de anillo (el modelo central) y otros dos iguales para los imanes cilíndricos.

En la figura 11 únicamente se muestran los dos tipos de imanes que se han utilizado en el experimento.

En la figura 12 se aprecian todos los tipos de pesos que se han utilizado durante el transcurso del experimento. Únicamente se muestran los 3 tipos de pesos utilizados porque de todos se han utilizados más de una unidad.

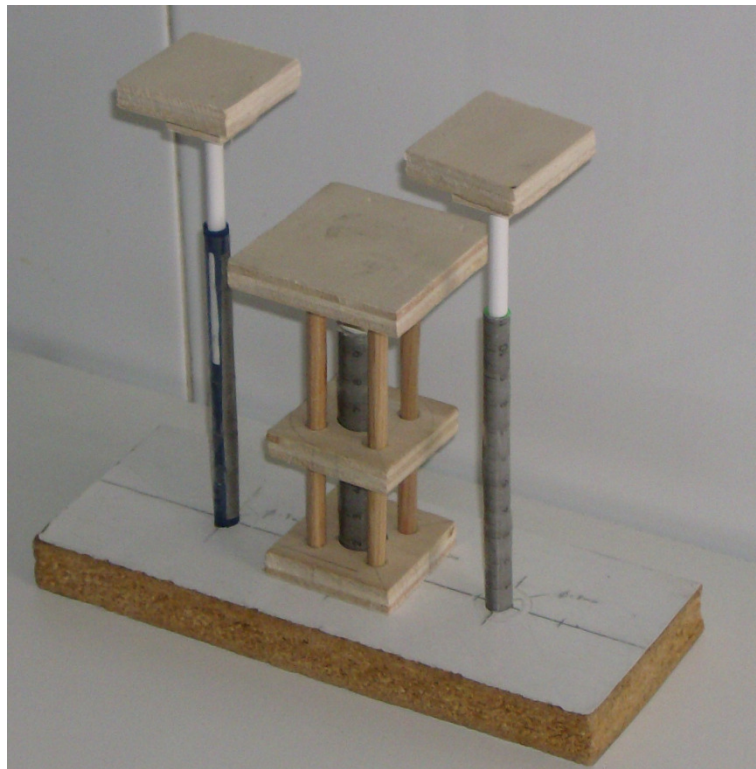


Figura 13: Sistema experimental.

En la figura 13 se puede observar el montaje de los elementos del sistema experimental tal y como serían sin incluir los imanes.

3.3 Datos del sistema de medición

Durante el procedimiento experimental sólo se han utilizado el modelo verde-transparente para los imanes cilíndricos y el modelo central para los imanes de anillo.

Para llevar a cabo las mediciones de una manera más precisa que las reglas que hay adheridas a cada uno de los modelos, se ha hecho uso de un calibre de precisión de plástico.

3.3.1 Medición para imanes anulares

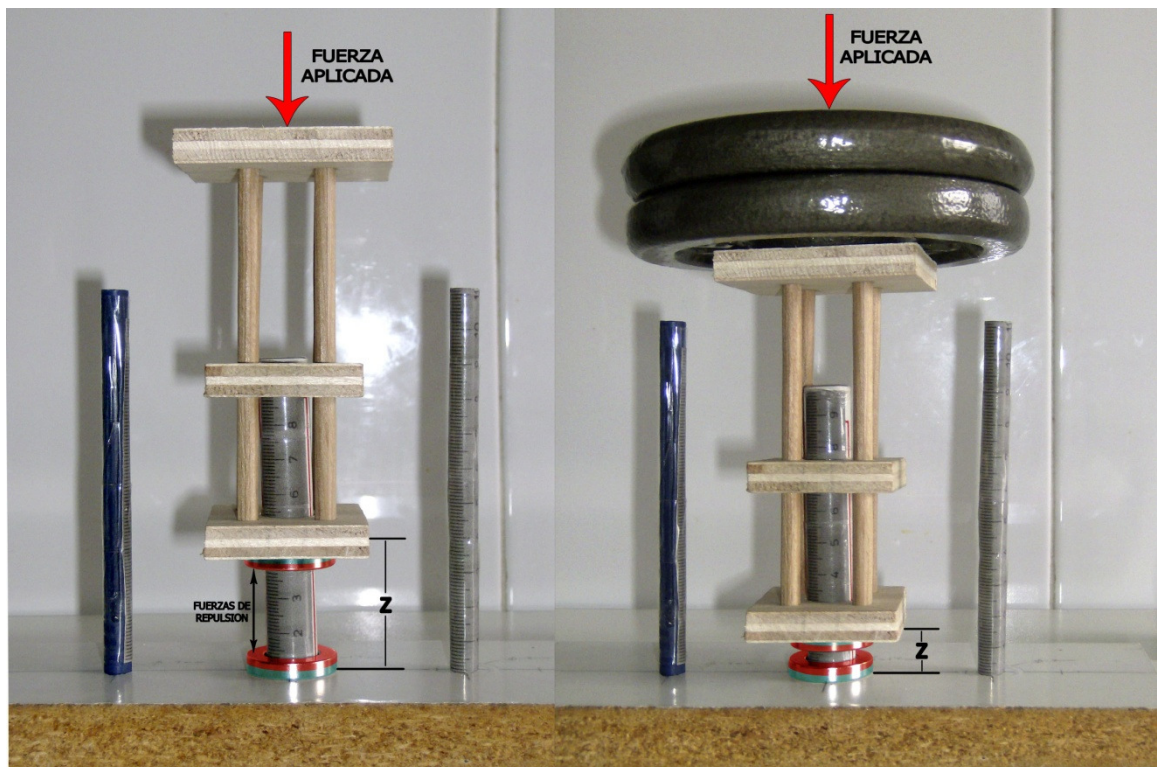


Figura 14: Sistema experimental con imanes anulares.

La figura 14 muestra la forma en que se ha llevado a cabo la experimentación con los imanes anulares.

Se realizan mediciones de con la altura total con los espesores de los imanes y la separación entre ellos, al cual se denomina “Z”.

Para el imán en forma de anillo se han realizado tres mediciones diferentes, cada una de ellas con diferente número de imanes, de forma que se pueda observar la variación de la compresión en función de la fuerza que reciben los imanes.

Las tablas 1, 2 y 3 muestran los datos obtenidos en cada una de las mediciones realizadas.

Además de las mediciones, dichas tablas muestran la variación de una hipotética constante de restitución como si se tratase de un muelle en vez de imanes. Para ello se ha utilizado la fórmula siguiente:

$$F=F_0+Kx$$

Como fuerza de precarga (F_0) se ha utilizado la fuerza aplicada para conseguir que cada uno de los sistemas (2,3 y 4 imanes) se encuentren a la misma altura inicial (34,3 mm), permitiendo de esta manera la comparación de los mismos.

3.3.1.1 Medición para 2 imanes anulares

2 imanes			
Z(mm)	Fuerza(N)		K2 (N/mm)
34,3	0,91	I1+P+PP1 ¹	0,033
26,1	2,79	I1+P+P1	0,236
21,1	5,12	I1+P+P1+P2	0,325
18,5	9,97	I1+P+T1	0,572
16,7	14,60	I1+P+P1+P2+T1	0,781
15,5	19,91	I1+P+T1+T2	1,019
14,8	24,54	I1+P+P1+P2+T1+T2	1,217
14,4	29,15	I1+P+T1+T2+T3	1,425
13,2	33,78	I1+P+P1+P2+T1+T2+T3	1,563
12,5	38,94	I1+P+T1+T2+T3+T4	1,741
11,3	48,74	I1+P+T1+T2+T3+T4+T5	2,084
11	58,614	I1+P+T1+T2+T3+T4+T5+T6	2,480
10,5	68,44	I1+P+T1+T2+T3+T4+T5+T6+T7	2,841
10,2	78,07	I1+P+T1+T2+T3+T4+T5+T6+T7+T8	3,201
10	82,69	I1+P+P1+P2+T1+T2+T3+T4+T5+T6+T7+T8	3,379

Tabla 1: Mediciones experimentales para 2 imanes anulares.

¹ I1, P, P1, P2, T1, T2, T3, T4, T5, T6, T7, T8, PP1, PP2, PP3 y PP4 son los diferentes pesos utilizados durante el experimento.

3.3.1.2 Medición para 3 imanes anulares

3 imanes			
Z(mm)	Fuerza(N)		K3 (N/mm)
34,3	4,51	I1+P+PP1+PP2+PP3+PP4	0,138
33,9	5,11	I1+P+P1+P2	1,525
27	9,97	I1+P+T1	0,753
23	14,60	I1+P+P1+P2+T1	0,894
20,7	19,91	I1+P+T1+T2	1,139
19,5	24,54	I1+P+P1+P2+T1+T2	1,354
18,8	29,15	I1+P+T1+T2+T3	1,594
17,1	33,78	I1+P+P1+P2+T1+T2+T3	1,707
16,4	38,94	I1+P+T1+T2+T3+T4	1,926
16	48,74	I1+P+T1+T2+T3+T4+T5	2,425
15,8	58,61	I1+P+T1+T2+T3+T4+T5+T6	2,922
15,5	68,44	I1+P+T1+T2+T3+T4+T5+T6+T7	3,401
15,2	78,07	I1+P+T1+T2+T3+T4+T5+T6+T7+T8	3,857
15	82,69	I1+P+P1+P2+T1+T2+T3+T4+T5+T6+T7+T8	4,053

Tabla 2: Mediciones experimentales para 3 imanes anulares.

3.3.1.3 Medición para 4 imanes anulares

4 imanes			
Z(mm)	Fuerza(N)		K4 (N/mm)
34,3	9,97	I1+P+T1	0,295
32,4	14,60	I1+P+P1+P2+T1	2,432
29	19,91	I1+P+T1+T2	1,872
27,4	24,54	I1+P+P1+P2+T1+T2	2,111
25,8	29,15	I1+P+T1+T2+T3	2,264
24,9	33,78	I1+P+P1+P2+T1+T2+T3	2,537
24,1	38,94	I1+P+T1+T2+T3+T4	2,846
22	48,74	I1+P+T1+T2+T3+T4+T5	3,153
21,5	58,61	I1+P+T1+T2+T3+T4+T5+T6	3,802
20,8	68,44	I1+P+T1+T2+T3+T4+T5+T6+T7	4,339
20,5	78,07	I1+P+T1+T2+T3+T4+T5+T6+T7+T8	4,947
20	82,69	I1+P+P1+P2+T1+T2+T3+T4+T5+T6+T7+T8	5,090

Tabla 3: Mediciones experimentales para 4 imanes anulares.

Una vez vistos los resultados obtenidos, se ha llevado a cabo una gráfica que ilustra la variación de la fuerza en función de las alturas que se han ido obteniendo para todos los casos, siendo el resultado del mismo, el que se observa en la figura 15.

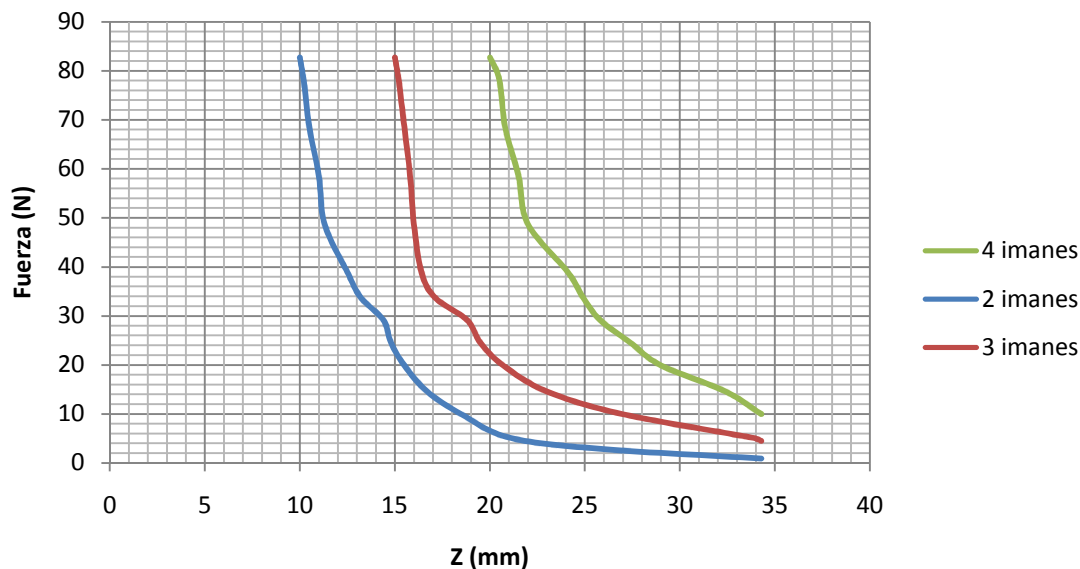


Figura 15: Gráfica Fuerza-Altura para los imanes anulares.

Como se puede observar en la figura 15, las curvas que se obtienen para las tres configuraciones de imanes son muy parecidas, consiguiéndose en todos los casos una fuerza máxima muy similar.

La diferencia entre los tres casos radica en la carga inicial que hay que aplicar para que el sistema mantenga la misma altura, ya que la rigidez inicial para las diferentes configuraciones es diferente. Sin embargo, la variación de la rigidez a lo largo de la compresión de los imanes es similar para los tres casos.

3.3.2 Medición para imanes cilíndricos

Para el imán cilíndrico se han realizado únicamente dos mediciones diferentes con distinto número de imanes (Debido a que el sistema no podía recibir más de tres imanes de este tipo)

De esta manera se pueda observar la variación de la compresión en función de la fuerza que reciben los imanes.

Al igual que para el caso de los imanes anulares, se ha calculado una hipotética constante de restitución como si se tratasen de muelles.

3.3.2.1 Mediciones para 2 imanes cilíndricos

2 imanes			
Z(mm)	Fuerza(N)		K2 (N/mm)
61,975	0,52	P+P1	0,045
58,65	0,95	P+P1+P2	0,135
56,9475	1,38	P+P1+P2+P3	0,177
55,85	1,81	P+P1+P2+P3+P4	0,214
55,1	2,41	P+T1	0,263
54,4	2,83	P+T1+P1	0,310
53,95	3,26	P+T1+P1+P2	0,349
53,65	3,69	P+T1+P1+P2+P3	0,388
53,35	4,13	P+T1+P1+P2+P3+P4	0,423
53,075	4,73	P+T1+T2	0,476
52,75	5,15	P+T1+T2+P1	0,514
52,5	5,58	P+T1+T2+P1+P2	0,539
52,3	6,02	P+T1+T2+P1+P2+P3	0,572
52,15	6,45	P+T1+T2+P1+P2+P3+P4	0,611
51,3	10,05	P+T3	0,890
50,5	12,36	P+T3+T1	1,031
50	14,68	P+T3+T1+T2	1,181

Tabla 4: Mediciones experimentales para 2 imanes cilíndricos.

3.3.2.2 Mediciones para 3 imanes cilíndricos

3 imanes			
Z(mm)	Fuerza(N)		K3 (N/mm)
96,6	0,52	P+P1	0,061
91,4	0,95	P+P1+P2	0,085
89,1	1,38	P+P1+P2+P3	0,123
87,1	1,81	P+P1+P2+P3+P4	0,127
84,9	2,41	P+T1	0,160
84	2,83	P+T1+P1	0,186
83,1	3,26	P+T1+P1+P2	0,204
82,4	3,69	P+T1+P1+P2+P3	0,228
82	4,13	P+T1+P1+P2+P3+P4	0,253
80,9	4,73	P+T1+T2	0,276
80,7	5,15	P+T1+T2+P1	0,299
80,3	5,59	P+T1+T2+P1+P2	0,311
79,8	6,02	P+T1+T2+P1+P2+P3	0,332
79,5	6,45	P+T1+T2+P1+P2+P3+P4	0,356
78	10,05	P+T3	0,512
77	12,36	P+T3+T1	0,604
75	14,68	P+T3+T1+T2	0,668

Tabla 5: Mediciones experimentales para 3 imanes cilíndricos.

La figura 16 muestra la variación de la fuerza en función de la altura para el ensayo realizado con los imanes cilíndricos.

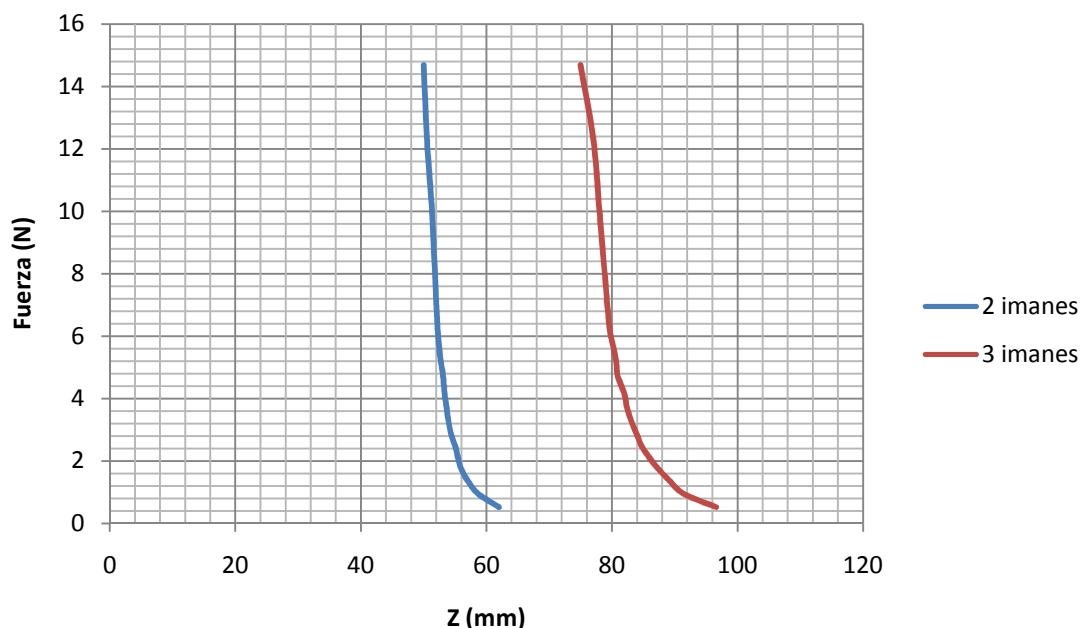


Figura 16: Gráfica Fuerza - Altura para los imanes cilíndricos.

Al igual que en el caso de los imanes anulares, se puede observar como varía la fuerza de repulsión entre los imanes en función de la compresión que haya entre ellos.

La forma de la curva es muy parecida en ambos casos, siendo la fuerza máxima de compresión prácticamente la misma para las diferentes configuraciones de imanes.

3.4 Conclusiones del experimento

La conclusión a la que se llega en el estudio experimental es que la fuerza máxima de repulsión para diferente número de imanes es muy similar o prácticamente la misma para imanes del mismo tipo (Anulares o cilíndricos)

De esta manera, se puede jugar con la configuración de los sistemas para modificar la precarga del mismo (En función de si hay más o menos imanes), sabiendo que siempre va a soportar una determinada carga máxima.

La configuración de los imanes permite obtener un comportamiento muy similar al que se obtendría con un resorte helicoidal de rigidez variable, es decir, cuanto mayor es la carga que soporta el sistema, mayor es la rigidez del mismo.

Capítulo 4

Estudio teórico

4.1 Descripción del modelo

En el estudio teórico se lleva a cabo el diseño de los sistemas de imanes que se han probado en el estudio experimental, para de esta manera, llevar a cabo la comparación con el experimento realizado. Este estudio teórico ha sido realizado conjuntamente con el tutor Efrén Díez Jiménez.

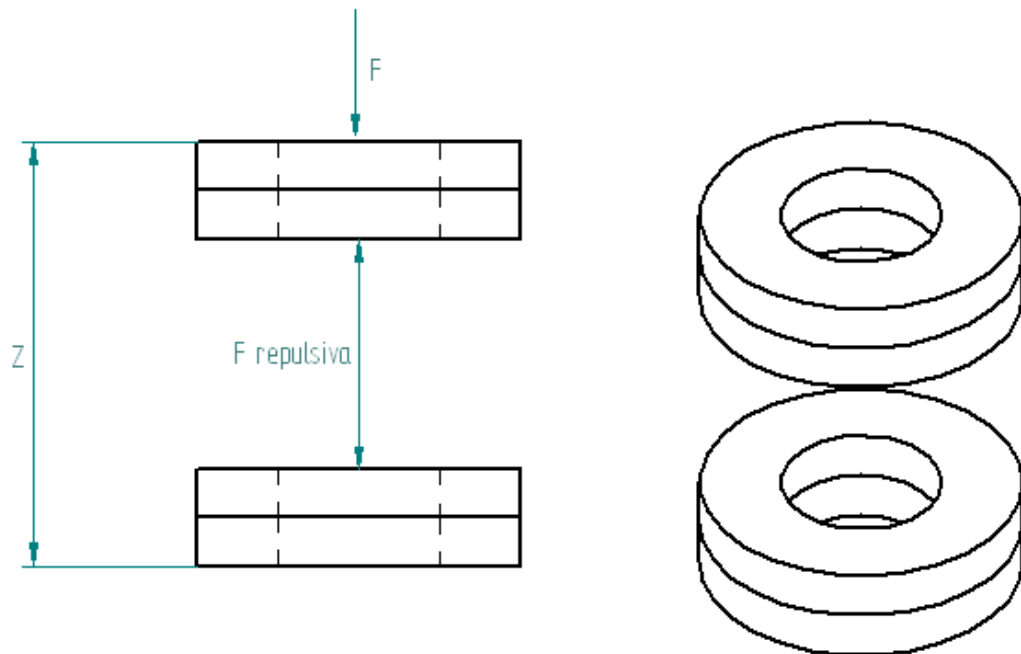


Figura 17: Croquis estudio teórico.

Capítulo 4: Estudio teórico

El estudio se ha iniciado con el modelado de los imanes que se han utilizado en el estudio experimental, mediante un programa de elementos finitos, que en caso que nos ocupa ha sido el Maxwell.

Para ello, se han realizado diferentes modelos, en función del tipo de imanes, y de la configuración para cada uno de ellos (Dos, tres o cuatro imanes). Debido a la simetría del problema se han hecho modelos bidimensionales con simetría axial.

En el caso teórico, se disponen los imanes a una determinada distancia, y el programa Maxwell se encarga de mostrarnos los datos de fuerzas para dicha configuración.

Las imágenes de las figuras 18 y 19 muestran la configuración y el comportamiento de los imanes durante el desarrollo del estudio teórico por elementos finitos.

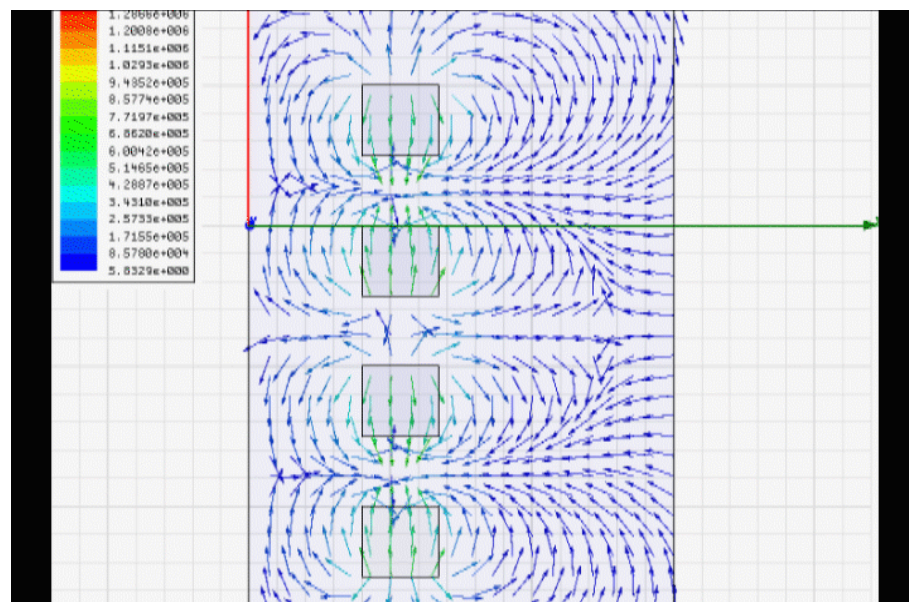


Figura 18: Configuración 1 de imanes en el programa Maxwell.

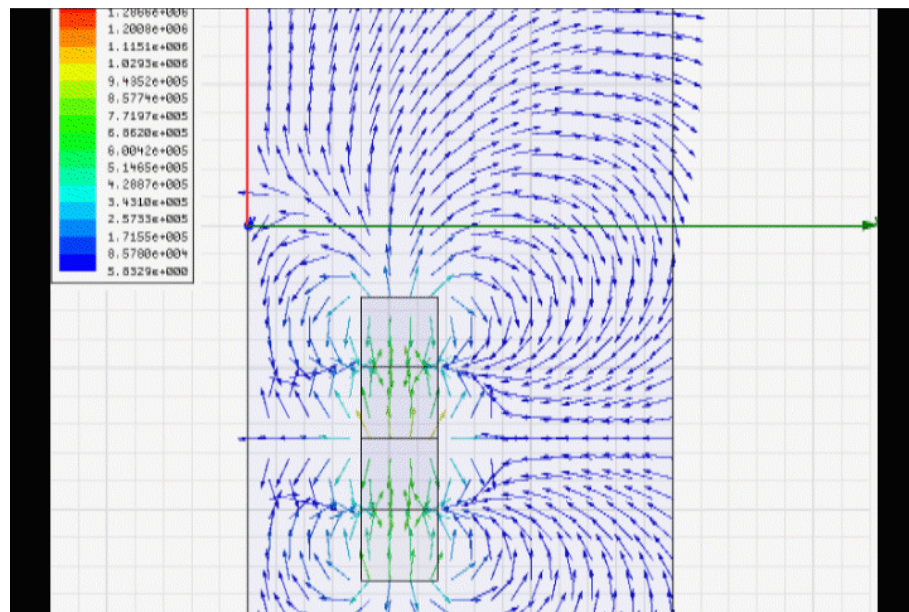


Figura 19: Configuración 2 de imanes en el programa Maxwell.

4.2 Datos del estudio teórico

4.2.1 Datos para los imanes anulares

Las tablas siguientes recogen todos los datos obtenidos para las tres configuraciones de imanes que se han experimentado.

4.2.1.1 Datos para 2 imanes anulares

2 imanes		
Z(mm)	Fuerza(N)	K2 (N/mm)
10	86,93	3,443
11	57,72	2,369
12	38,52	1,638
13	27,10	1,193
14	19,45	0,886
15	14,64	0,689
16	11,21	0,546
17	8,86	0,446
18	7,15	0,371
19	5,81	0,310
20	4,87	0,268
21	4,08	0,231
22	3,50	0,204
23	2,75	0,159
24	2,61	0,160
25	2,28	0,144
26	2,05	0,134
27	1,74	0,112
28	1,64	0,114
29	1,40	0,092
30	1,32	0,096
31	1,26	0,103
32	1,08	0,079
33	1,13	0,144
34	1,15	0,305
35	0,84	0,169

Tabla 6: Datos teóricos para 2 imanes anulares.

4.2.1.2 Datos para 3 imanes anulares

3 imanes		
Z (mm)	Fuerza(N)	K3 (N/mm)
15	71,51	3,097
17	48,98	2,281
19	32,77	1,634
21	22,96	1,224
23	16,57	0,943
25	12,35	0,748
27	9,39	0,602
29	7,33	0,495
31	5,91	0,423
33	4,80	0,357
35	4,03	0,330

Tabla 7: Datos teóricos para 3 imanes anulares.

4.2.1.3 Datos para 4 imanes anulares

4 imanes		
Z (mm)	Fuerza(N)	K4 (N/mm)
20	78,01	4,660
23	52,10	3,524
26	34,81	2,628
29	24,30	2,044
32	17,63	1,685
35	12,39	1,811
21,5	66,28	4,265
24,5	42,10	2,999
27,5	29,15	2,341
30,5	20,62	1,838
33,5	15,10	1,313

Tabla 8: Datos teóricos para 4 imanes anulares.

A la vista de los datos proporcionados por el programa Maxwell, se ha llevado a cabo una gráfica que ilustra la variación de la fuerza en función de las alturas que se han ido obteniendo, siendo el resultado el que se observa en la gráfica de la figura 20.

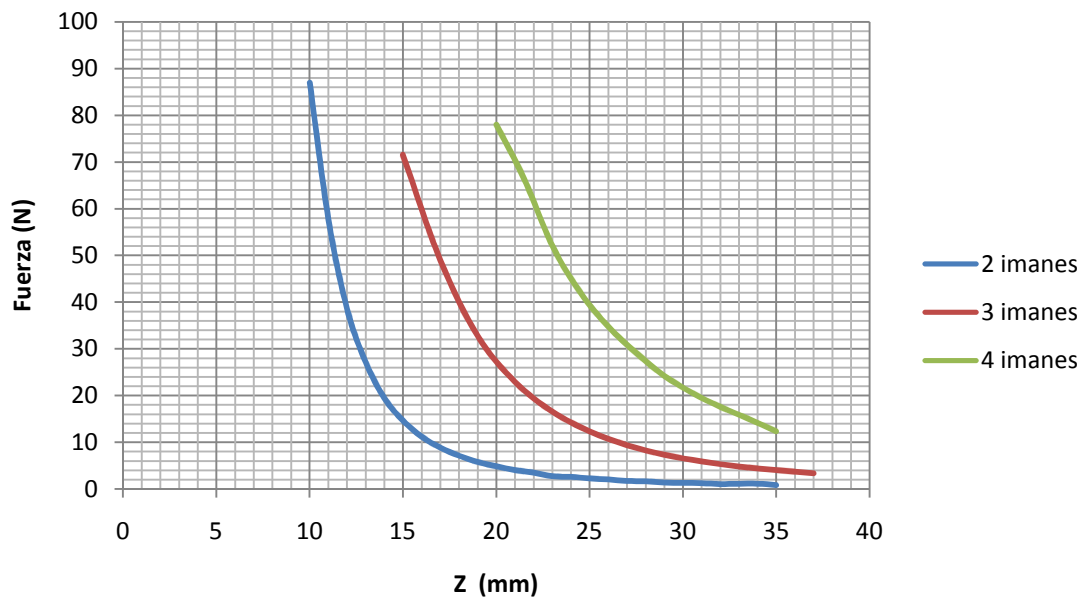


Figura 20: Gráfica Fuerza - Altura para los imanes anulares.

Si se observa la figura 16 se ve que la evolución de la fuerza en función de la altura para las distintas configuraciones de imanes es muy similar para todas ellas, obteniéndose una fuerza máxima muy parecida.

4.2.2 Datos para los imanes cilíndricos

En las tablas 9 y 10 se recogen todos los datos obtenidos para las diferentes configuraciones de imanes que se han experimentado.

4.2.2.1 Datos para 2 imanes cilíndricos

2 imanes		
Z (mm)	Fuerza (N)	K2 (N/mm)
50	13,81	1,028
50,5	12,84	0,992
51	9,97	0,794
51,5	8,09	0,665
52	6,68	0,567
52,5	5,51	0,482
53	4,54	0,410
53,5	3,78	0,351
54	3,03	0,288
54,5	2,70	0,265
55	2,57	0,266
55,5	2,09	0,219
56	1,81	0,196
56,5	1,59	0,177
57	1,40	0,160
57,5	1,23	0,143
58	1,21	0,152
58,5	1,17	0,162
59	1,03	0,145
59,5	0,84	0,113
60	0,81	0,121
60,5	0,82	0,151
61	0,66	0,111
61,5	0,57	0,081
62	0,60	0,161
62,5	0,51	0,136
63	0,44	0,037

Tabla 9. Datos teóricos para 2 imanes cilíndricos.

4.2.2.2 Datos para 3 imanes cilíndricos

3 imanes		
Z (mm)	Fuerza (N)	K3 (N/mm)
75	14,10	0,614
77	10,27	0,484
79	6,86	0,347
81	4,83	0,264
83	3,14	0,182
85	2,53	0,161
87	1,95	0,135
89	1,34	0,092
91	1,26	0,110
93	0,89	0,073
95	0,63	0,016
97	0,60	0,011

Tabla 10. Datos teóricos para 3 imanes cilíndricos.

Una vez vistos los resultados obtenidos, se ha llevado a cabo una gráfica que ilustra la variación de la fuerza en función de las alturas que se han ido obteniendo, siendo el resultado el que se muestra en la figura 21.

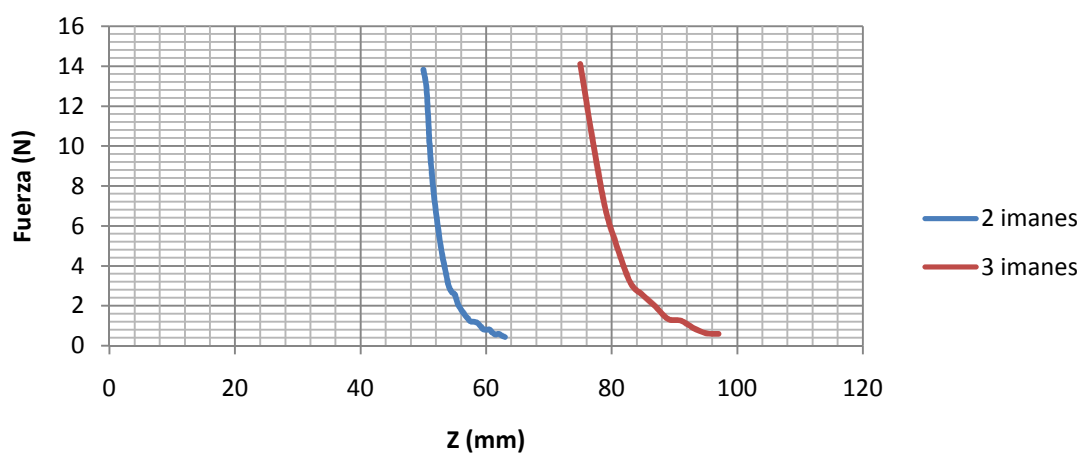


Figura 21: Gráfica Fuerza - Altura para los imanes cilíndricos.

La figura 21 muestra la evolución de la fuerza en función de la altura de los imanes cilíndricos, observándose como ambas las curvas tienen una forma similar para cada una de las configuraciones.

4.3 Conclusiones del cálculo teórico

Al igual que para el caso experimental, la principal conclusión a la que se llega con el estudio teórico es que la fuerza máxima que se obtiene para cada una de las configuraciones de imanes es prácticamente la misma para el mismo tipo de imanes (Anulares o cilíndricos)

Otra conclusión que se extrae del estudio teórico (al igual que en el estudio experimental) es la progresividad de las curvas a medida que se disminuye la distancia entre los imanes.

Capítulo 5

Comparativa de estudios

5.1 Comparativa imanes anulares

En este apartado se va a hacer la comparativa de los estudios realizados anteriormente, de manera que se puede determinar si ambos estudios presentan datos similares el uno al otro y se puede concluir con unos datos lógicos.

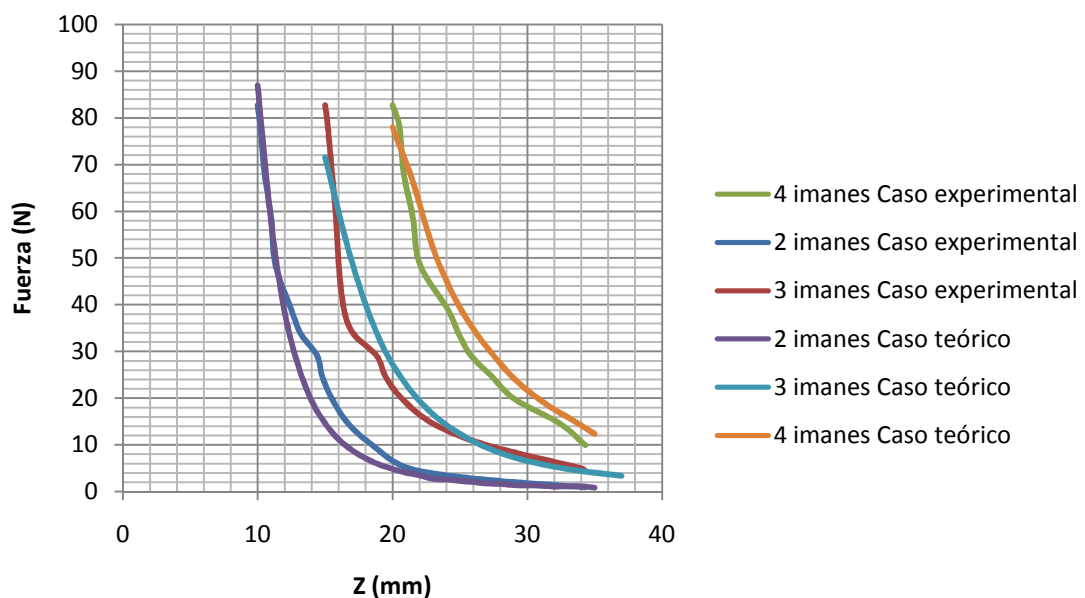


Figura 22: Gráfica Fuerza – Altura para los imanes anulares (Experimental y teórico).

En la figura 22 se puede observar como los valores obtenidos de forma experimental y teórica son muy parecidos para los imanes anulares.

Sólo existe una pequeña fluctuación en la zona intermedia, pero los valores máximos que se alcanzan son prácticamente los mismos para las diferentes configuraciones de imanes.

Se observa que, para cada una de las configuraciones, el estudio teórico muestra una curva más progresiva y sin fluctuaciones que el caso experimental.

Esto se debe a los errores de precisión que existen al hacer la toma de los datos del estudio experimental.

5.2 Comparativa imanes cilíndricos

Al igual que con los imanes anulares, se ha llevado a cabo una comparativa de los imanes cilíndricos para el estudio teórico y experimental.

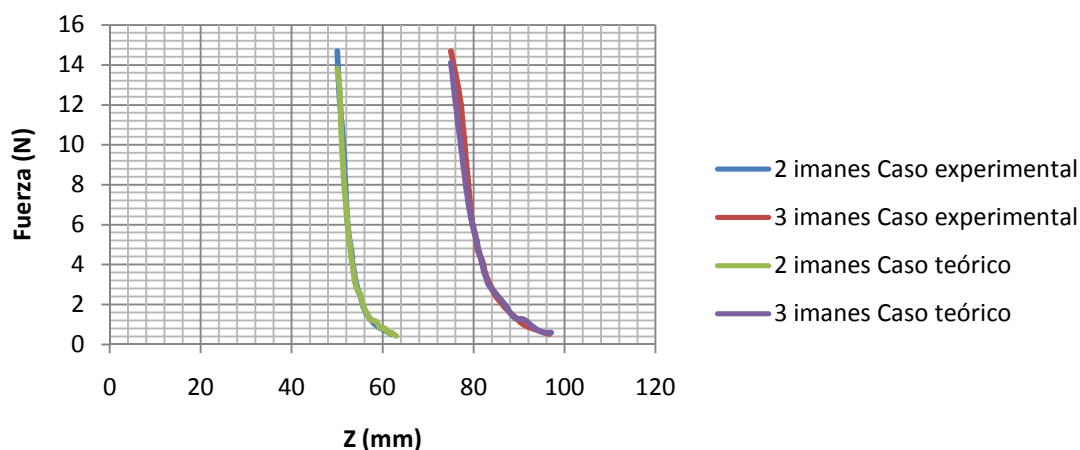


Figura 23: Gráfica Fuerza – Altura para los imanes cilíndricos (Experimental y teórico).

En la gráfica de la figura 23 se puede observar como los valores obtenidos de forma experimental y teórica son prácticamente iguales para los imanes cilíndricos.

Se observa que, para la configuración de tres imanes, la curva es prácticamente la misma, siendo un poco diferente para la configuración de dos imanes.

Las pequeñas variaciones se deben a los errores de precisión que existen al hacer la toma de los datos del estudio.

Capítulo 6

Presupuesto

En el presupuesto adjunto se detalla el coste estimado que ha supuesto la realización del estudio.

Capítulo 6: Presupuesto

Presupuesto Nº 28072011					
	Precio (€)	IVA (18%) (€)	Precio unitario (€)	Unidades	Total (€)
Tablero de madera 250x150x10 mm	12,7118	2,2882	15	1	15
Tablero conglomerado 300x150x19 mm	16,95	3,05	20	1	20
Bolígrafo BIC	0,2543	0,0457	0,3	2	0,6
Rotulador Edding	2,966	0.534	3,5	2	7
Anillo magnético ø26,75/16 mm H5 mm	1,8559	0,3341	2,19	4	8,76
Barra magnética ø6,35mm H25,4 mm	1.66	0.3	1,96	3	5,88
Honorarios (Horas)	38,14	6.86	45	40	1800
			Subtotal (€)	IVA (18%) (€)	Total (€)
Total			1573,93	283,31	1857,24

En el presupuesto anterior se puede observar el valor de cada uno de los elementos empleados para la realización del proyecto. No se incluyen los precios del software utilizado, ya que la utilización del mismo se incluye dentro de los honorarios establecidos.

Capítulo 7

Aplicación del sistema de imanes a una moto

7.1 Introducción

Una vez que hemos analizado la viabilidad de un sistema de imanes permanentes como sustituto de un resorte helicoidal, se procederá a la aplicación del mismo a un sistema de suspensión para un vehículo, centrándose en el sistema de recuperación de una motocicleta.

Concluido el estudio de fuerzas de los imanes, habrá que ver que requisitos presenta un resorte de suspensión de una motocicleta, viendo las geometrías que tiene y los requerimientos de fuerza que le son necesarios, pudiendo así dimensionar los imanes para que realicen tal labor.

7.2 Estado del arte

Lo primero que se ha llevado a cabo es la investigación del estado del arte, buscando datos acerca de posibles soluciones ya investigadas y analizadas para un sistema de suspensión.

Si se observa la tabla 11 se puede ver la referencia a una patente de un sistema de suspensión de repulsión magnético el cual se basa en campos magnéticos en oposición con el fin de generar la suficiente fuerza para conseguir la levitación de las masas colocadas en la parte superior del dispositivo.

Título: Dispositivo formado por una suspensión magnética de precisión	
Fecha de presentación: 24/04/2003	Solicitante: NUEVAS TECNOLOGÍAS ENERGÉTICAS Y AMBIENTALES S.L.
Fecha de publicación de la solicitud: 16/08/2003	Inventor: Massor Alejandro, Tomás

Tabla 11: Patente de un sistema de repulsión magnético.

El conjunto descrito anteriormente está formado por una base, un cuerpo central que se encarga del guiado y la estabilidad de los imanes y un soporte superior para la sujeción y mantenimiento de las masas a soportar.

Los elementos marcados en la figura 1 son los siguientes:

Elemento 1: Espárrago roscado o tornillo para sujetar la masa a suspender.

Elemento 2: Tuerca de apriete y sujeción.

Elemento 3: Arandela de soporte de tuerca.

Elemento 4: Cuerpo del mecanismo de soporte del imán superior y de la suspensión flotante.

Elemento 5: Imán superior (Con polo norte orientado al otro imán)

Elemento 6: Cilindro de material termoplástico o guía de los imanes.

Elemento 7: Anclaje para evitar la apertura total de la suspensión.

Elemento 8: Imán inferior (Con polo norte orientado al otro imán)

Elemento 9: Cuerpo del mecanismo de soporte del imán inferior y de sujeción a la base.

Elemento 10: Mecanismo (Mediante rosca) para regular la altura de la suspensión y equilibrar con las demás suspensiones.

Elemento 11: Arandela de soporte de tuerca.

Elemento 12: Tuerca de apriete y sujeción.

Elemento 13: Espárrago roscado o tornillo para sujetar la suspensión al suelo o a la base que lo soporte.

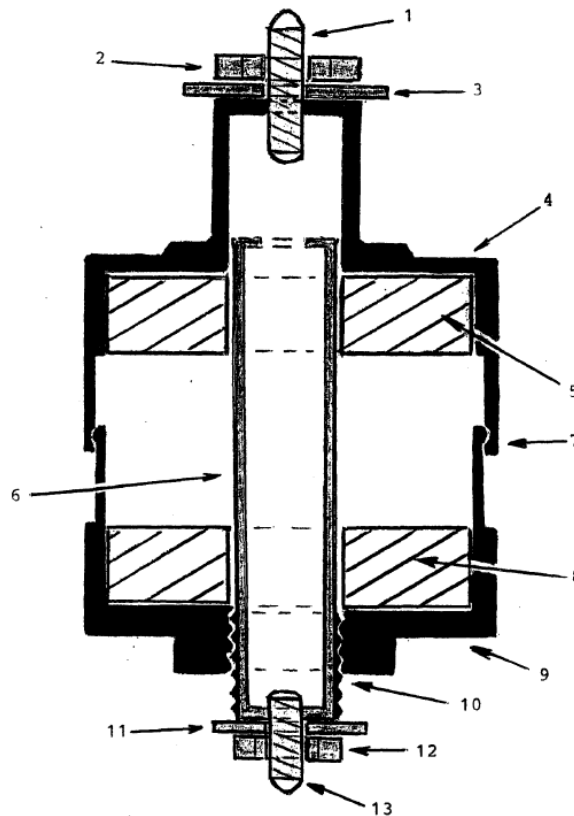


Figura 24: Dispositivo formado por una suspensión magnética de precisión.

7.3 Estudio realizado

Como el objeto del estudio es un sistema de suspensión de una motocicleta, se ha llevado a cabo la búsqueda de datos sobre un sistema acerca del mismo.

La figura 25 muestra el esquema de suspensión trasera de la moto que se ha tomado para hacer el estudio de sustitución del muelle por un sistema de imanes.

En ella se pueden observar todas las características geométricas del resorte helicoidal que se pretende sustituir por un conjunto de imanes permanentes que desarrollen el mismo trabajo.

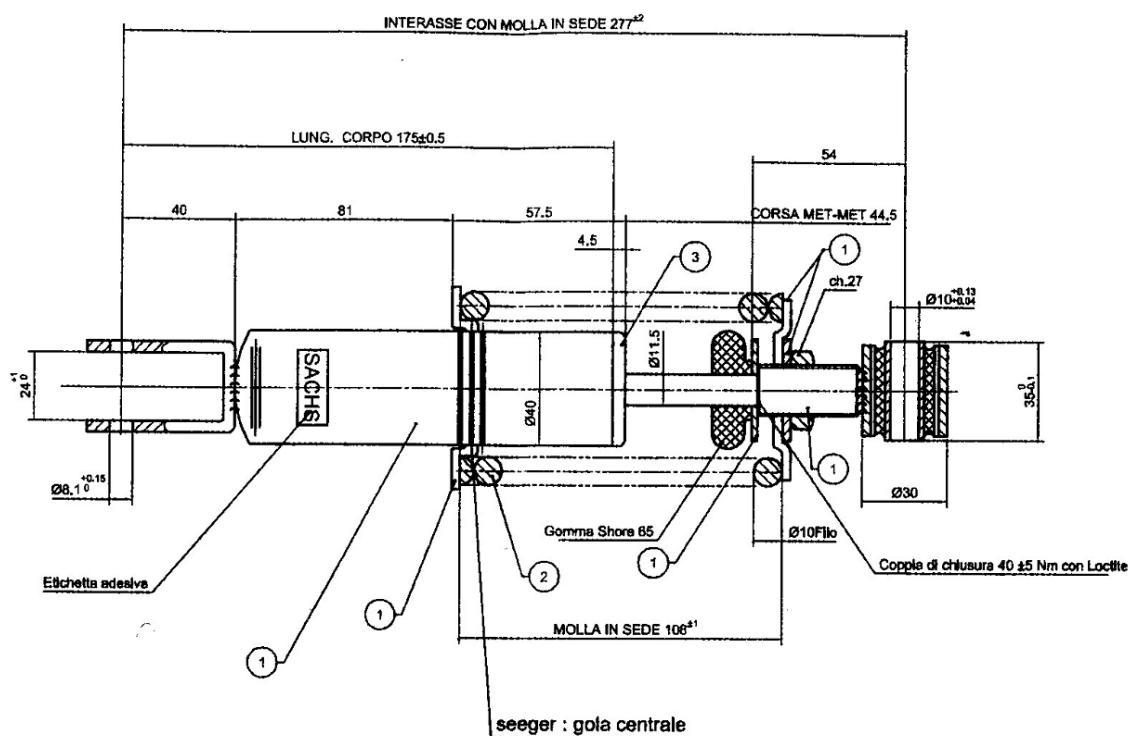


Figura 25: Amortiguación de la moto objeto de estudio.

Las principales características del muelle son las siguientes:

L(libre)	122 mm
L(inicial)	108 mm
Diámetro Externo	70 mm
Diámetro Interno	50 mm
Diámetro Muelle	10 mm
Número de espiras	5,5

Tabla 12: Características del muelle.

Con estos datos y con el valor de la constante de rigidez (Se puede ver en la Figura 13), se pueden obtener los valores de precarga y de fuerza máxima para el muelle.

Precarga	$F_0 = KX$	1638 N
Fuerza Máxima	$F = F_0 + KX$	7578 N

Tabla 13: Precarga y fuerza máxima del muelle.

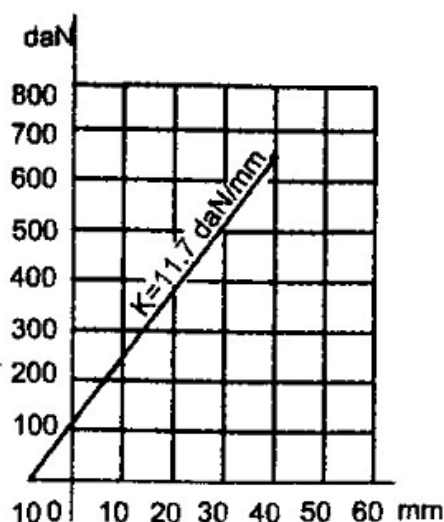


Figura 26: Gráfica Fuerza – Compresión para el muelle de la moto.

Una vez que se han obtenido los valores de precarga y de fuerza máxima se puede llevar a cabo en diseño del muelle magnético para que tenga valores similares.

Para el caso del diseño se va a hacer uso de imanes de tipo anular como los que se ha usado en el caso experimental.

7.4 Proceso de diseño

El proceso de diseño de los imanes permanentes para una suspensión de motocicleta se ha llevado a cabo con el programa de elementos finitos Ansys.

El código base a partir del cual se han ido modificando las variables de diseño para poder modelar el sistema de restitución de la motocicleta se puede observar en el ANEXO.

El proceso de modelado ha requerido el diseño de diferentes configuraciones en número de imanes, y del tamaño de los mismos.

La figura 27, muestra algunas imágenes del proceso de diseño del sistema de suspensión de la motocicleta.

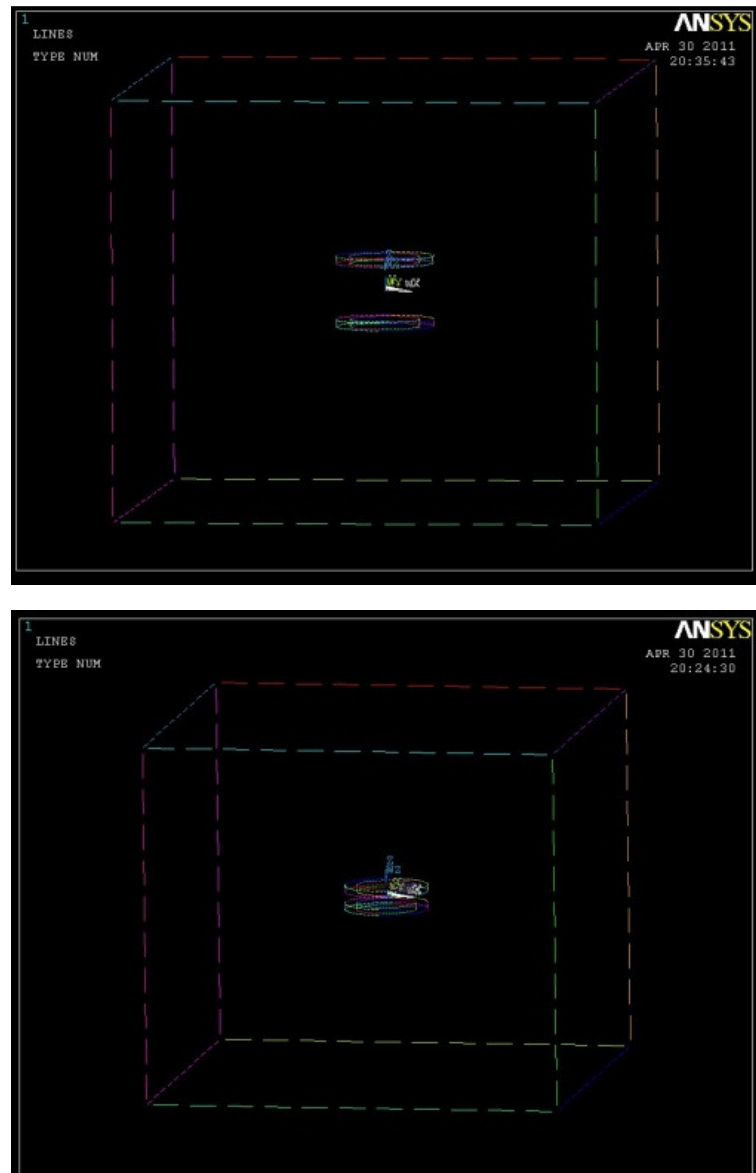


Figura 27: Imagen de 2 imanes para la suspensión de motocicleta.

7.5 Datos obtenidos

Se ha realizado el estudio para una configuración de 2 imanes, ya que las configuraciones de más imanes, tal y como se ha visto en los casos anteriores, mostrarán curvas similares a la de 2, siendo la fuerza máxima la misma, y variando únicamente la precarga.

En la figura 28 se puede observar un croquis del diseño que se quiere llevar a cabo con el programa Ansys para el modelado de la suspensión de la motocicleta.

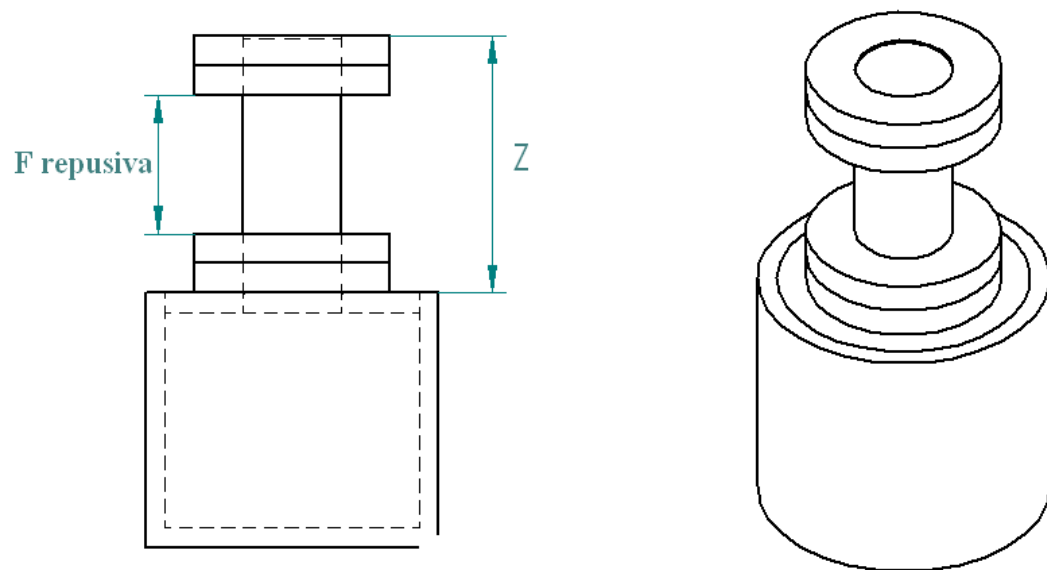


Figura 28: Croquis del resorte magnético de la suspensión de motocicleta.

7.5.1 Resultados para los imanes

Lo primero que se va a realizar es un estudio con las medidas de longitud y diámetro que corresponden al resorte helicoidal.

En caso de no conseguir los resultados deseados, se llevará a cabo un modelo diferente al muelle helicoidal pero que pueda tener similares valores de fuerza.

7.5.1.1 Altura de 5 mm, Rext de 35 mm y Rint de 25 mm

Los imanes utilizados para el experimento tienen 5 mm de altura, una radio exterior de 35 mm y un radio interior de 25 mm.

2 imanes		
Z (mm)	Fuerza (N)	K2 (N/mm)
11	256,87	2,629
12	155,83	1,604
13	103,45	1,069
14	106,88	1,117
15	98,91	1,043
20	54,42	0,597
30	39,13	0,477
40	28,17	0,386
50	27,74	0,446
60	26,03	0,503
70	20,06	0,478
80	15,32	0,479
90	4,80	0,162
100	3,85	0,245
108	1,89	0,135

Tabla 14: Datos para 2 imanes y altura 5 mm.

La tabla 14 recoge todos los datos obtenidos para la configuración de imanes que se han experimentado en el programa Ansys con las geometrías que se han tomado como referencia para este caso.

Como resultado de los datos proporcionados por el programa Ansys, se ha obtenido la gráfica de la variación de la fuerza de la figura 25.

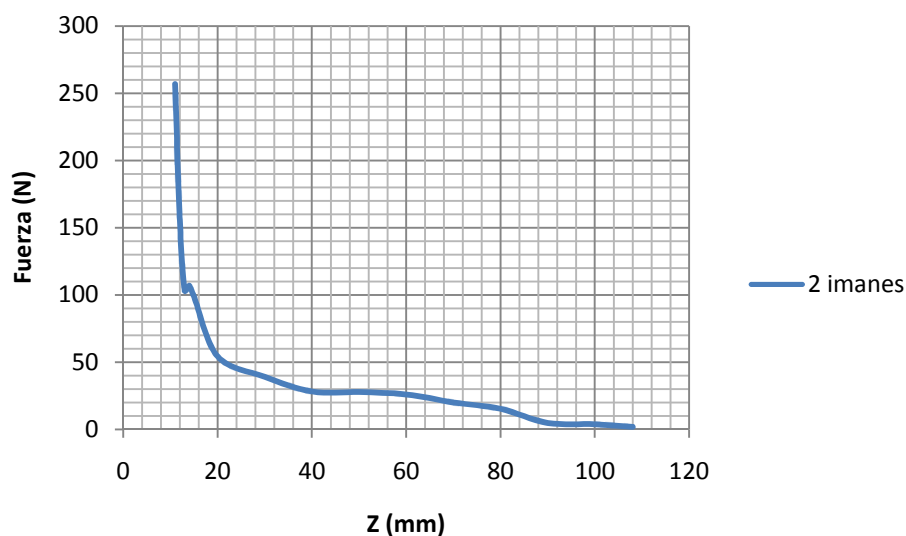


Figura 29: Gráfica Fuerza – Altura con un imán de 5mm de altura.

En la figura 29 se observa como la progresión de la curva es similar a la que se obtiene en los casos teórico y experimental.

Se ha llevado a cabo el estudio para el dato de espacio que nos proporciona el modelo de moto, obteniéndose valores muy pequeños de fuerza para Z grandes.

Para aprovechar bien la fuerza de los imanes, se debería de reducir el espacio libre que tiene el imán, a una distancia acorde a la fuerza que proporcionan los imanes.

En este caso, se puede ver como la fuerza varía muy poco cuando la Z es menor de 40 mm, por lo que la altura máxima para coger datos, debería de ser ese valor.

Si realizamos la gráfica hasta el valor que hemos indicado (40 mm), la representación quedará muy próxima a la que se obtiene en el estudio experimental y teórico. El resultado queda reflejado en la gráfica de la figura 26.

Se eliminan los valores de fuerza superiores a los 40 mm porque, en esos puntos, la curva es prácticamente plana y tiene muy poca variación de fuerza.

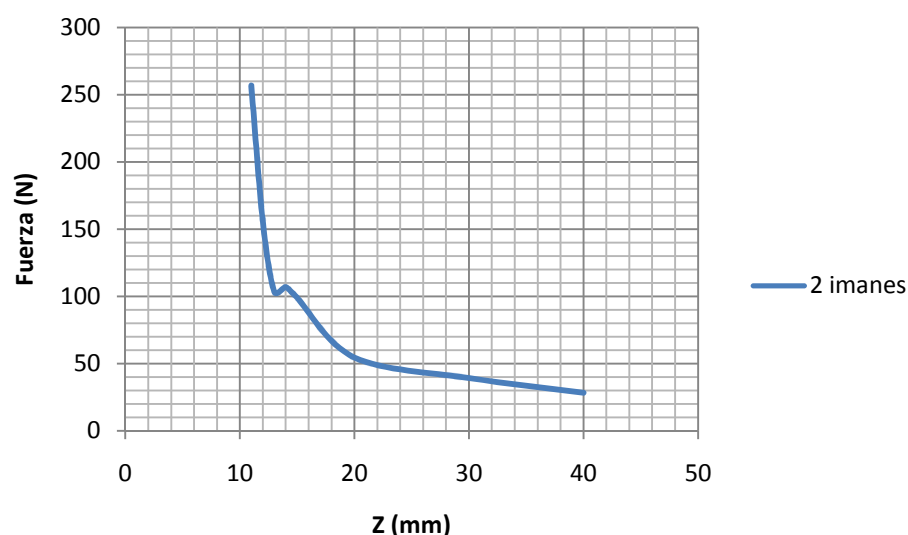


Figura 30: Gráfica Fuerza – Altura con un imán de 5mm de altura modificado.

7.5.1.2 Altura de 10 mm, Rext de 35 mm y Rint de 25 mm

Como la fuerza no llegaba al valor que se necesitaba, se ha probado modificando la altura del imán a 1 cm de altura, quedando invariante los radios, interior y exterior.

Los resultados obtenidos para este segundo caso se recogen en la tabla 15.

2 imanes		
Z (mm)	Fuerza (N)	K2 (N/mm)
21	403,66	4,705
22	288,39	3,420
23	175,67	2,134
24	154,46	1,907
25	139,93	1,755
30	84,70	1,159
40	29,76	0,522
50	25,05	0,530
60	24,14	0,622
70	10,33	0,422
80	2,85	0,308
90	-6,84	-0,063
100	-12,91	-0,901
108	-5,71	-0,408

Tabla 15: Datos para 2 imanes y altura 10 mm.

Una vez recogidos los datos se ha llevado a cabo la representación gráfica de las fuerzas, quedando el resultado que se aprecia en la figura 31.

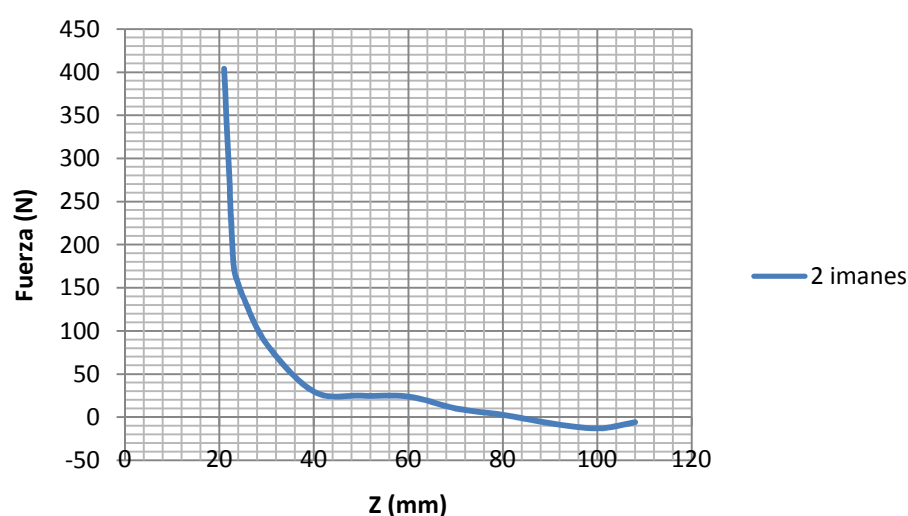


Figura 31: Gráfica Fuerza – Altura con un imán de 10 mm de altura.

Como ocurre en el caso de los imanes de 5 mm de altura, la fuerza que se obtiene no es lo suficientemente grande como para poder llevar a cabo la solicitud que requiere el sistema de suspensión de la moto.

Aun así, del mismo modo que en el caso anterior, la única parte válida para su utilización en un modelo sería hasta el valor de z de 40 mm, quedando reflejada dicha variación en la figura 32.

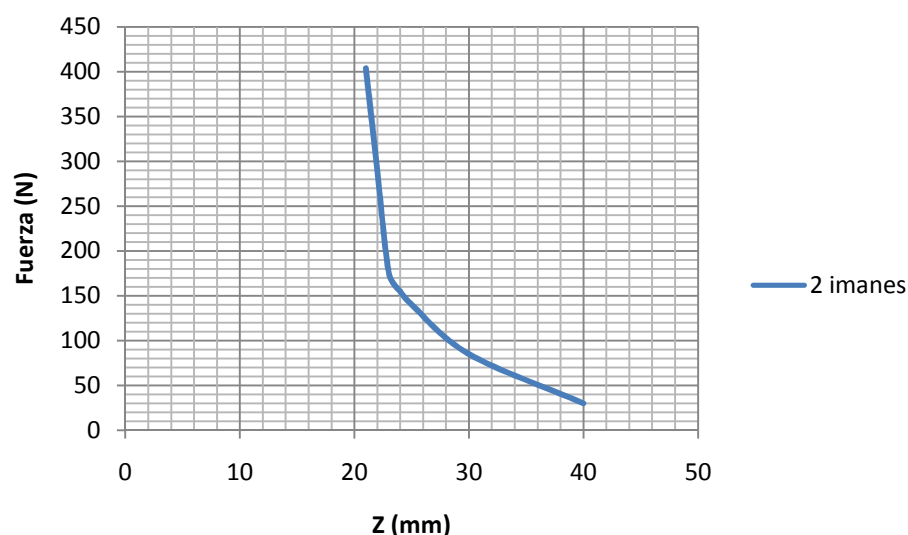


Figura 32: Gráfica Fuerza – Altura con un imán de 10mm de altura modificado.

7.5.1.3 Altura de 25 mm, Rext de 35 mm y Rint de 25 mm

Se ha probado con un nuevo aumento de altura para el imán para poder conseguir una fuerza mayor. Sin embargo, como demuestra la tabla 16, la fuerza no se aproxima a la máxima que consigue el muelle (7578 N)

2 imanes		
Z (mm)	Fz (N)	K2 (N/mm)
51	571,74	9,902
52	441,92	7,761
53	275,18	4,870
54	232,59	4,172
55	212,53	3,872
60	129,03	2,536
70	59,90	1,384
80	38,57	1,116
90	28,78	1,193
100	24,34	2,129
108	7,31	0,522

Tabla 16: Datos para 2 imanes y altura 25 mm.

La figura 33 muestra la representación gráfica de los datos que se han obtenido para unos imanes de 25 mm de altura.

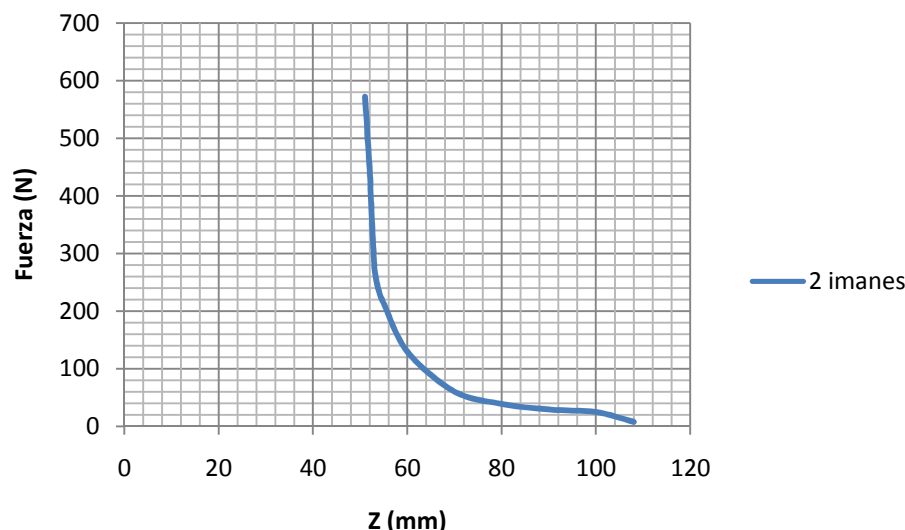


Figura 33: Gráfica Fuerza – Altura con un imán de 25 mm de altura.

Este caso es el que más se aproxima al estudio teórico que se realizó con anterioridad.

No hay la necesidad de quedarse con una parte del sistema como en los casos anteriores ya que la fuerza tiene variación durante todo el tramo de alturas.

Sin embargo, no se consiguen los valores deseados para la sustitución del resorte helicoidal por el muelle de restitución.

7.6 Modificación del muelle magnético

La modificación para el sistema de imanes va a consistir en la variación del diámetro de los imanes.

Esto se debe a que como se demostró con los estudios teórico y experimental, la variación del número de imanes lo que hace es modificar la precarga del sistema pero no la fuerza máxima, que en todos los casos es la misma.

Para el objeto del estudio, nos vamos a quedar con imanes de altura 25 mm, debido a que son los que consiguen mayor fuerza, y partiendo de ellos, intentar conseguir un sistema que pueda tener valores similares a los del muelle helicoidal.

Se va a modelar un sistema con dos imanes que tengan 25 mm de radio interno y 70 mm de radio externo.

Los resultados obtenidos son los que recoge la tabla 17.

2 imanes		
Z (mm)	Fz (N)	K2 (N/mm)
51	2445,18	42,021
52	2283,70	39,888
53	2045,45	36,282
54	1877,39	33,841
55	1694,56	31,030
60	1120,70	22,307
70	648,35	15,747
80	396,76	12,386
90	299,13	13,843
100	157,43	13,433
108	49,96	3,569

Tabla 17: Datos para 2 imanes y altura 25 mm.

La representación de los datos obtenidos y que recoge la tabla 17 se puede observar en la gráfica de la figura 34.

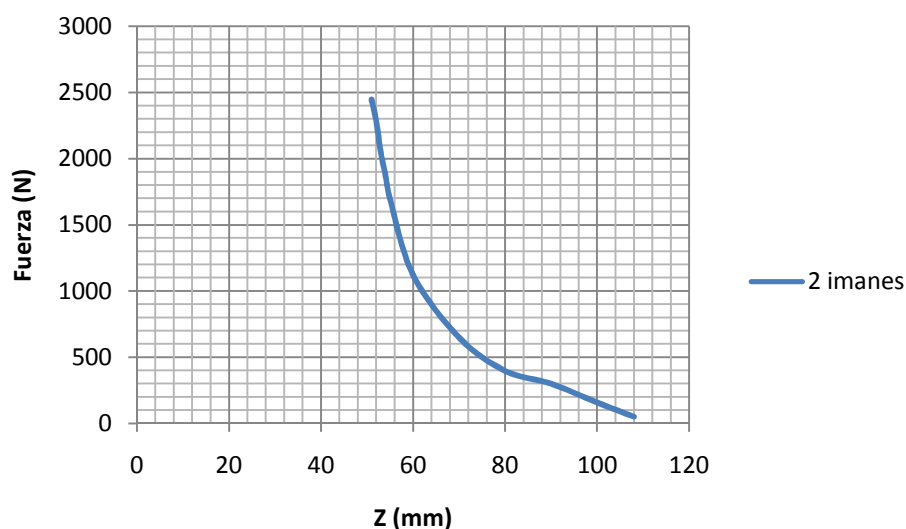


Figura 34: Gráfica Fuerza – Altura con un imán de 25 mm de altura modificado.

La gráfica tiene la misma forma que todas las que se ha visto anteriormente, e incluso, es más próxima a las obtenidas en los estudios teórico y experimental.

Sin embargo, aunque la curva es mucho más parecida a la que se obtiene en los estudios teórico y experimental, la fuerza conseguida con los imanes es pequeña en comparación con la que necesitamos para el diseño.

7.7 Conclusiones del modelado de un muelle magnético para una moto

La principal conclusión que se obtiene del modelado de muelle magnético para una moto es la imposibilidad de realizar un diseño que sea viable para las condiciones geométricas que presenta el modelo helicoidal.

Como segundo conclusión, se puede ver la dificultad de obtenerse unos valores de fuerza elevados, ya que el modelo que mayor fuerza obtiene esta entorno a los 2500 N (2445 N) de fuerza máxima, cuando el modelo helicoidal puede proporcionar una valor máximo de 7578 N.

Además del problema de obtenerse una fuerza máxima muy baja, ésta se consigue con un sobredimensionado de los imanes del muelle magnético. Es decir, existe una necesidad de tener radios mayores para conseguir cargas grandes.

Capítulo 8

Conclusiones generales del estudio

Lo primero que se puede concluir del estudio de imanes permanentes es la capacidad para poder sustituir un resorte mecánico por un sistema de imanes permanentes ya que permiten una progresividad similar al de un resorte helicoidal.

Como se ha demostrado en el estudio, el sistema de imanes permanentes permite una rigidez variable al conjunto, ya que a medida que se aproximan unos a otros (Con polaridad opuesta) mayor es la fuerza de repulsión que se generan entre ellos.

De esta manera se podrá tener un sistema restitutivo similar a un resorte mecánico pero con imanes permanentes.

Sin embargo, dicho sistema presenta una serie de ventajas e inconvenientes con respecto al sistema de restitución mecánico convencional.

8.1 Ventajas

La ventaja de la utilización de dicho muelle magnético reside en la eliminación de la fatiga a la que se ve sometido un resorte mecánico durante su periodo de vida útil.

Este sistema tiene la gran ventaja de la regulación de la precarga del sistema mediante el cambio de configuración de los imanes (En función del número de imanes) sin modificar la fuerza máxima que puede soportar el sistema.

Los imanes permanentes presentan la ventaja de poder sustituir un elemento del sistema en caso de que no haya un correcto funcionamiento del mismo, ya que si uno de

los imanes pierde sus propiedades, sería fácilmente reemplazable por otro con las mismas propiedades.

8.2 Inconvenientes

Este sistema presenta varios inconvenientes.

El primero viene por la limitación de la fuerza que ejercen los propios imanes permanentes, lo que obliga a un sobredimensionado de los mismos para poder diseñar un modelo que permita complacer los requerimientos del diseño a realizar.

Es decir, si queremos obtener grandes fuerzas, tendremos que tener imanes con diámetros grandes, lo que provoca que sea difícil el diseño de un sistema pequeño que genere grandes cargas.

Para conseguir un sistema pequeño que generase grandes cargas habría que irse a electroimanes que regulen intensidades y permitan variar la fuerza.

El segundo inconveniente viene asociado a las características de los materiales de diseño de los modelos, ya que no pueden interferir en el trabajo a desarrollar por el sistema de imanes permanentes.

Es decir, no se pueden utilizar materiales alrededor que sean magnetizables o ferromagnéticos ya que afectarían al modelo y limitarían las propiedades restitutivas del mismo.

El tercer problema al que se enfrenta un modelo de imanes permanentes es la pérdida de las propiedades magnéticas del imán, que acarrearían la pérdida de la eficiencia del mismo.

El último problema, y probablemente el más problemático es el costo del sistema, ya que los imanes son unos elementos que suelen ser caros, y si es necesaria la generación de grandes cargas, pueden suponer el diseño de un sistema bastante costoso.

Como los materiales que componen los imanes nos son fácilmente localizables, esto puede suponer un aumento a la hora del dimensionado del sistema.

Anexo

Código Ansys para el modelado del sistema de suspensión de motocicleta

/PREP7

Lo primero que se lleva a cabo es la definición del tipo de elemento con el que se va a trabajar en el programa.

ET,1,SOLID96

A continuación se definen las propiedades del material con el que se llevará a cabo el dimensionado de los imanes.

MP,MURX,1,1

HC=0.955E06 (Coercitividad)

BR=1.29 (Remanencia)

MU=12.5664E-7

Pi=3.141592654

MP,MGZZ,2,-HC

MP,MURX,2,BR/(MU*HC)

MP,MGZZ,3,+HC

MP,MURX,3,BR/(MU*HC)

Una vez que se ha llevado a cabo la definición del tipo de elemento y de las propiedades del material, se lleva a cabo la definición de la geometría del material.

Primero se definen radio, alturas la separación entre imanes.

rint=0.016

rext=0.02675

hi=0.005

sep=0.0067

A continuación se lleva a cabo el modelado de la geometría del sistema con el que se va a trabajar en el Ansys.

wpof,0,0,sep/2

CYL4,0,0,rint, ,rext, ,hi

WPCSYS,-1 (coloca el Workingplane con el sistema de coordenadas global)

wpof,0,0,-sep/2

CYL4,0,0,rint, ,rext, ,-hi

WPCSYS,-1

ladobox=10*rext

altbox=0.30

BLOCK,-ladobox/2,ladobox/2,-ladobox/2,ladobox/2,-altbox/2,altbox/2

Vovlap,all

Anexo

Una vez se ha realizado el modelado del sistema, se procederá a la aplicación de las propiedades a los volúmenes, ya que tenemos los imanes y el volumen de trabajo.

```
CM,_Y,VOLU
VSEL,,,, 1
CM,_Y1,VOLU
CMSEL,S,_Y
!*
CMSEL,S,_Y1
VATT, 2,, 1, 0
CMSEL,S,_Y
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
!*
CM,_Y,VOLU
VSEL,,,, 2
CM,_Y1,VOLU
CMSEL,S,_Y
!*
CMSEL,S,_Y1
VATT, 3,, 1, 0
CMSEL,S,_Y
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
!*
CM,_Y,VOLU
VSEL,,,, 4
CM,_Y1,VOLU
CMSEL,S,_Y
!*
CMSEL,S,_Y1
VATT, 1,, 1, 0
CMSEL,S,_Y
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
!*
```

Una vez se ha definido el volumen de los elementos del sistema, se lleva a cabo el mallado de los mismos.

```
SMRT,6
SMRT,1
MSHAPE,1,3D
MSHKEY,0
!*
FLST,5,3,6,ORDE,3
FITEM,5,1
FITEM,5,-2
```

```
FITEM,5,4  
CM,_Y,VOLU  
VSEL,,,P51X  
CM,_Y1,VOLU  
CHKMSH,'VOLU'  
CMSEL,S,_Y  
!*  
VMESH,_Y1  
!*  
CMDELE,_Y  
CMDELE,_Y1  
CMDELE,_Y2  
!*
```

Definido y mallado el sistema se procede a la aplicación de las cargas y las condiciones de contorno al sistema.

```
/SOL  
FLST,2,6,5,ORDE,2  
FITEM,2,1  
FITEM,2,-6  
SFA,P51X, ,MXWF
```

Hecha toda la configuración del sistema de imanes, se lleva a cabo la resolución del mismo para ver los resultados obtenidos.

```
/SOLU  
MAGSOLV                   ! Solve magnetic field  
SAVE
```

Resuelto el sistema llevamos a cabo la visualización de las fuerzas que se obtienen con diseño creado.

```
/POST1  
ETABLE,FMAGX,FMAG,X  
ETABLE,FMAGY,FMAG,Y  
ETABLE,FMAGZ,FMAG,Z  
SSUM
```

Una vez se ha analizado los resultado que se han obtenido con este diseño, lo que se hace es ir modificando las distancias entre los imanes para aproximarlos y así conseguir fuerzas mayores.

Hecho esto, se meten todos los resultados obtenidos en una tabla de Excel para poder crear una gráfica que muestre la evolución de la fuerza con la distancia.